



Ruissellement et risque majeur, crue centennale en milieu urbanisé. Etudes de cas : le Grand-Bornand, Nîmes, Paris et Vaison-la-Romaine

Martine Guiton

► To cite this version:

Martine Guiton. Ruissellement et risque majeur, crue centennale en milieu urbanisé. Etudes de cas : le Grand-Bornand, Nîmes, Paris et Vaison-la-Romaine. Hydrologie. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1994. Français. NNT : . pastel-00569131

HAL Id: pastel-00569131

<https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00569131>

Submitted on 24 Feb 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

Présentée à

L'ÉCOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSÉES

pour obtenir le grade de

DOCTEUR de l'ENPC
Spécialité Sciences et Techniques de l'Environnement

par

Martine GUITON

Sujet

RUISSELLEMENT ET RISQUE MAJEUR
Crue centennale en milieu urbanisé
Etudes de cas : le Grand-Bornand, Nîmes,
Paris et Vaison-la-Romaine

soutenue à Paris, le 3 février 1994

devant le jury composé de :

M. R. POCHAT
Mme Y. DEWOLF
M. B. CHOCAT
M. J.L. DURVILLE
M. J. P. MAGNAN

Président
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Directeur de thèse

M. M. BOURGES
M. J.F. COSTE

Invité
Invité

TOME 1

80803

NS 17575(4)

t.1

X

Thèse dédiée à la Décennie Internationale
de la Prévention des Catastrophes
Naturelles 1990-2000 de l'O.N.U.
(résolution A/42/169 de Novembre 1987)



REMERCIEMENTS

Je remercie le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées pour son accueil, et son aide pour mes recherches.

Je remercie en premier Monsieur Jean-Pierre MAGNAN, Directeur Technique au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées et Directeur de cette thèse, d'avoir retenu le sujet du ruissellement risque majeur dès avril 1987 pour mon mémoire de D.E.A., puis d'avoir conforté, soutenu, guidé ce travail, chaque fois réactualisé par les quatre catastrophes que nous avons vécues.

Je remercie infiniment Monsieur Jean-Louis DURVILLE, Chef de la Division Mécanique des Sols et Géologie de l'Ingénieur au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées et Conseiller pour cette recherche, qui en tant que responsable des recherches sur les risques majeurs m'a ouvert les portes des laboratoires et a guidé ma recherche au niveau du risque majeur, avec beaucoup de patience face à mes investigations.

Car j'avais eu l'occasion d'observer ce risque dès 1984, pour l'avoir "provoqué" artificiellement à mon grand étonnement sur des chantiers de génie-civil suite aux compactages et aux chaulages des plates-formes.

Je remercie beaucoup Messieurs Rémy POCHAT, Jean NOYELLE, Georges RAIMBAULT, Hervé ANDRIEU et Marc LIVET qui, par leurs remarques, m'ont aidé à positionner mon travail, par rapport à leurs recherches.

Je remercie aussi Messieurs Jean-François JATON, le Professeur MUSY et François MATTHEY de la Confédération Helvétique, Madame Claire COGEZ de la Division Eau et Aménagement du Département de la Seine-Saint-Denis, et Monsieur Raymond DELAVIGNE de l'I.A.U.R.I.F., de m'avoir donné leur avis sur ce nouveau risque, et d'avoir ainsi conforté mon opinion de terrain acquise à l'Électricité de France.

Je remercie l'équipe internationale du M.A.B. à l'UNESCO (Programme Man and Biosphere) de m'avoir reçue régulièrement et de m'avoir transmis les documents internationaux sur ce sujet.

Je remercie enfin Électricité de France et en particulier son organisme de formation individuelle, de m'avoir permis de commencer ce travail dans de très bonnes conditions.

Cette thèse m'a apportée les réponses que je cherchais et surtout les arguments et les moyens pour convaincre de la lutte contre ce risque.

SIGLES

AFEE	Association Française pour l'Etude des Eaux
CEFIGRE	Centre de Formation International pour la Gestion des Ressources en Eau.
CEMAGREF	Centre National du Machinisme Agricole du Génie Rural des Eaux et Forêts .
CERGRENE	Centre d'Enseignement et de Recherche pour la Gestion des Ressources Naturelles et de l'Environnement .
CERMES	Centre d'Enseignement et de Recherche en Mécanique des Sols.
CREDA	Centre de Recherche sur les Dysfonctionnements de l'Adaptation - Paris .
DEA	Direction de l'Eau et de l'Assainissement du Conseil Régional de Seine-Saint-Denis.
DRM	Délégation aux Risques Majeurs de la Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques du Ministère de l'Environnement.
ECOTHEK	Banque de données sur le développement et l'Environnement local.
IAURIF	Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région d'Ile-de-France.
MAB	Programme Mondial of " Man and the Biosphère"
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
LRPC	Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées.
ORSTOM	Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer.
RTM	Service de la Restauration des Terrains en Montagne du Ministère de l'Agriculture.

T A B L E D E S M A T I E R E S

RUISELLEMENT ET RISQUE MAJEUR

Crue centennale en milieu urbanisé

Etudes de cas: le Grand-Bornand, Nîmes,
Paris et Vaison-La-Romaine

T O M E -1-

RESUME	6
INTRODUCTION GENERALE	8
1-Définition du sujet: le ruissellement	
2-Ruissellement et risque majeur	
3-Définition des secteurs soumis au ruissellement	
4-Description du phénomène	
5-L'amplification et la transformation du phénomène du ruissellement en risque majeur	
6-L'état des recherches fondamentales sur le ruissellement	
7-Des exemples de sinistres liés au ruissellement	
8-Facteurs aggravants et limitants et techniques de lutte urbaine contre le ruissellement	
9-Elaboration d'une méthode pour le contrôle du risque majeur de ruissellement	
10-Les méthodes de prévision, de détection et de protection du risque de ruissellement dans différents pays	
a- Les méthodes de prévision	
b- Les méthodes de détection	
c- Les techniques de protection	
11-Conclusion	

CHAPITRE 1 ETAT DES RECHERCHES SUR LE RUISELLEMENT

1.1 LES SOURCES DE DOCUMENTS	21
1.1.1. Généralités	21
1.1.2. Les lieux	22
1.1.3. Les mots-clés	22
1.1.4. Les documents	23
1.1.5. Les sujets traités	27

1.2	L'ORIGINE DU RUISSELLEMENT	29
1.2.1.	Description de la naissance du phénomène de ruissellement	29
1.2.2.	Les facteurs géologiques dans l'étude du ruissellement	38
1.2.3.	Les pluies	43
1.2.4.	Le rôle ralentisseur du couvert végétal	47
1.3	L'ETAT DES RECHERCHES AU NIVEAU DE LA PREVISION	57
1.3.1.	De la formation du ruissellement en milieu agricole	57
1.3.2.	Les zones de risques sensibles au ruissellement	61
1.3.3.	De la formation du ruissellement en milieu forestier	65
1.3.4.	De la formation du ruissellement en milieu urbain	71
1.3.5.	Calcul du ruissellement pour la prévision en milieu urbain	75
1.3.6.	La prévision du ruissellement par les méthodes naturalistes	79
1.3.7.	La prévision du ruissellement par les méthodes déterministes et les modèles hydrologiques	83
1.4	L'ETAT DES RECHERCHES AU NIVEAU DE LA PROTECTION	97
1.4.1.	L'état des recherches au niveau de la protection en milieu agricole : U.S.A., R.F.A., FRANCE, ITALIE	97
1.4.2.	Les défenses contre le ruissellement d'amont: 111 petits barrages et retenues collinaires	111
1.5	L'ETAT DE LA LEGISLATION	122
1.5.1.	Analyse des textes législatifs et des différents codes français relatifs au ruissellement	122
1.5.2.	Les textes législatifs relatifs au ruissellement de type risque majeur	128
1.5.3.	Les textes techniques relatifs au ruissellement	132

CHAPITRE 2 ANALYSE DE CATASTROPHES LIEES AU RUISSELLEMENT RISQUE MAJEUR

2.1 INTRODUCTION	137
2.2 DESCRIPTION DES CATASTROPHES	139
2.2.1. Catastrophes majeures	139
2.2.2. Catastrophes annexes	163
2.2.3. Description synthétique de catastrophes	169
2.3. LA GESTION DE LA CRISE	173
2.3.1. La gestion collective de la crise	173
2.3.2. Le comportement individuel pendant les crises	178
2.4 DES CATASTROPHES PREVISIBLES	183
2.4.1. Catastrophes prévisible de l'Université de Grenoble	183
2.4.2. Catastrophe prévisible de la rivière le Paillon à Nice et inondation du lycée d'Etat	185
2.4.3. Catastrophe prévisible à Clermont-Ferrand	187
2.4.4. Catastrophe prévisible à Lanslebourg-Mont-Cenis	191
2.4.5. Catastrophe prévisible à Morlaix	191

T O M E -2-

CHAPITRE 3 FACTEURS AGGRAVANTS ET LIMITANTS ET TECHNIQUES DE LUTTE CONTRE LE RISQUE MAJEUR DE RUISSELLEMENT

3.1. LES EFFETS DE LA LEGISLATION SUR LE RISQUE MAJEUR URBAIN DE RUISSELLEMENT	200
3.1.1. Les lois ont-elles aggravé ou limité le risque de ruissellement?	200
3.1.2. Classement des textes législatifs par rapport au risque majeur de ruissellement	204
3.1.3. Evolution souhaitable des textes législatifs	208
3.2. LES FACTEURS AGGRAVANTS DU RISQUE MAJEUR DE RUISSELLEMENT	218
3.2.1. Généralités	218
3.2.2. Les facteurs géomorphologiques	218
3.2.3. les facteurs anthropiques	236
3.2.4. Les incertitudes sur les données climatiques	252

3.3. LES FACTEURS LIMITANT LE RISQUE MAJEUR DE RUISSELLEMENT	
3.3.1. Généralités	292
3.3.2. Facteurs s'opposant à l'évolution catastrophique du ruissellement	292
3.3.3. Facteurs limitant les effets des écoulements catastrophiques	302
3.4. DES TECHNIQUES DE LUTTE URBAINE ET PERI-URBAINE CONTRE LE RUISSELLEMENT RISQUE MAJEUR	
3.4.1. Des techniques de lutte en urbanisme	318
3.4.2. Des techniques de lutte en architecture	320
3.4.3. Des techniques de lutte en paysage	338
3.4.4. Des techniques de lutte urbaine en infrastructure ,voirie publique	368
CHAPITRE 4 GESTION PREVENTIVE DU RISQUE MAJEUR DE RUISSELLEMENT DANS UN CENTRE URBAIN	
4.1. INTRODUCTION	
4.2. OBJECTIFS	
4.2.1. Origine du risque de ruissellement	448
4.2.2. Démarche pour contrôler le risque de ruissellement	448
4.2.3. Limites de l'étude	450
4.3. GESTION PREVENTIVE DU RISQUE MAJEUR DE RUISSELLEMENT.Etudes sur le cas de Nîmes	450
4.3.1. Généralités	450
4.3.2. L'existant	450
4.3.3. Modifications des capacités de stockage et d'écoulement	450
4.3.4. Les éléments de l'analyse économique analyse coût-avantage	468
4.4. DEMARCHE GENERALE DE GESTION PREVENTIVE DU RISQUE DE RUISSELLEMENT DANS LES CENTRES URBAINS	477
4.4.1. Introduction	477
4.4.2. Caractérisation du risque	477
4.4.3. Choix d'une solution	477
4.4.4. Utilisation d'une aide logistique existante : les services municipaux	478

CONCLUSION GENERALE	482
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	492
TABLE DES PHOTOS ET FIGURES	513

T O M E -3- A N N E X E S

A N N E X E -1-

La gestion du risque majeur de ruissellement dans le département de la Seine-Saint-Denis (France)	516
---	-----

A N N E X E -2-

La gestion du risque majeur de ruissellement dans le Canton de Vaud (Suisse)	607
---	-----

A N N E X E -3-

Textes juridiques et administratifs	679
-------------------------------------	-----

ABSTRACT

RUN-OFF WATERS AND DAMAGE FLOOD

The report analyses four cases of new French disasters: le Grand-Bornand (1987), Nîmes(1988), Paris(1990) and Vaison-La-Romaine (1992).

Chapter 1 deals with run-off waters definition in agricultural, forest and urban environment . Chapter 2 describes the four disasters, cited above, and some new foreseeable disasters. Chapter 3 is an attempt to analyse the reasons for aggravation or limitation of the impacts of rains and to describe techniques against run-off waters in urban site. At the end, a methodical guide with examples is proposed for the management of flood risks due to run-off waters.

The report is intended for the town and country planning experts (urban planners, architects, landscapers and street engineers). It gives complementary mark for sewage engineers, in fighting against centennial run-off waters.

In conclusion, the report sets up the basic techniques, for setting in motion appropriate means in fighting against run-off damages, knowing that such a fight must concern both, the formation of run-off waters and their effects. Furthermore, there are different technical solutions for each stage of the run-off process.

RESUME

RUISSELLEMENT ET RISQUE MAJEUR

Le travail présenté dans ce mémoire s'appuie sur quatre études de cas de récentes catastrophes françaises: le Grand-Bornand (1987), Nîmes(1988), Paris(1990) et Vaison-La-Romaine(1992).

Après avoir fait le point sur les connaissances actuelles sur les ruissellements en milieu agricole, forestier et urbain (chapitre 1) et avoir analysé les quatre catastrophes citées et des catastrophes prévisibles (chapitre 2), nous abordons les facteurs qui nous semblent aggraver ou limiter le risque pour en arriver à une série de propositions techniques de lutte contre le ruissellement en milieu urbain (chapitre 3). Enfin, un guide méthodologique et des exemples, pour approcher le problème de la gestion de ces crues, sont proposés.

Cette thèse, destinée aux aménageurs du territoire, Urbanistes, Architectes, Paysagistes et Ingénieurs de voirie, est une recherche multidisciplinaire : elle sert d'approche complémentaire aux efforts réalisés par les responsables des réseaux d'assainissement pour lutter contre les crues centennales.

Le rapport pose les bases techniques élémentaires pour enclencher les moyens de lutte contre le ruissellement, sachant que cette lutte doit s'effectuer aussi bien contre la formation du ruissellement que contre ses effets, et qu'à chaque phase différente du processus de ruissellement (rétention, conduite d'écoulement, protection) correspondent différentes solutions techniques.

MOTS-CLES	RUISSELLEMENT	PREVENTION
	INONDATION	RETENTION
	EROSION	PROTECTION
	CRUE CENTENNALE	RISQUE MAJEUR

RUISSELLEMENT ET RISQUE MAJEUR

INTRODUCTION

1 - DEFINITION DU SUJET : LE RUISSELLEMENT

Le ruissellement est un phénomène physique d'écoulement non organisé de l'eau sur un bassin-versant suite à des chutes de pluies. Il perdure jusqu'au moment où il rencontre une rivière, un réseau d'assainissement ou un marais.

Le ruissellement peut avoir plusieurs origines : ruissellement naturel pluvial, ruissellement naturel nival et ruissellement anthropique ; l'ensemble ou une seule de ces origines peut produire un ruissellement de type "Risque Majeur avec inondations".

Depuis l'origine des temps, le ruissellement existe à l'état naturel ; il a laissé des traces d'usure sur les roches, comme au Désert de Platé sur les lapiés (photo 1). Le ruissellement naturel, hors de toutes activités humaines, pose peu de problèmes à condition qu'il n'ait pas été "oublié" ; soit il est absorbé par les sols et la végétation, soit il suit un réseau hydrogéologique immuable et connu.

La force du ruissellement dépend d'une combinaison de multiples facteurs : l'intensité des précipitations, la valeur de la pente, la densité de la couverture végétale, etc. et surtout les activités humaines.

A l'heure actuelle, le phénomène étudié porte plusieurs noms. Les plus connus sont les ruissellements de battance et de saturation. On utilise aussi les termes : eaux de surface, écoulement de base, ruissellement de surface, lame ruisselée, ruissellement direct, ruissellement superficiel, inondations par eaux de surface, crue subite, crue torrentielle, crue éclair". Le Journal Officiel utilise le terme "inondations et coulées de boue".

Nous rappelons aussi que les "eaux pluviales" sont à l'origine exclusivement des eaux en provenance des toitures, des eaux relativement propres donc en opposition aux eaux usées d'origines ménagères et vannes, et que, dans le Bâtiment, elles continuent de garder ce sens.

Par contre, en hydrologie urbaine, dans les services d'assainissement, les "eaux pluviales" comprennent les eaux des voiries aussi bien que les eaux des toitures.

Mais dans ce mémoire, nous retiendrons le terme générique de RUISSELLEMENT, qui a un sens plus global et qui s'approche le mieux du terme anglais "RUNOFF WATER".

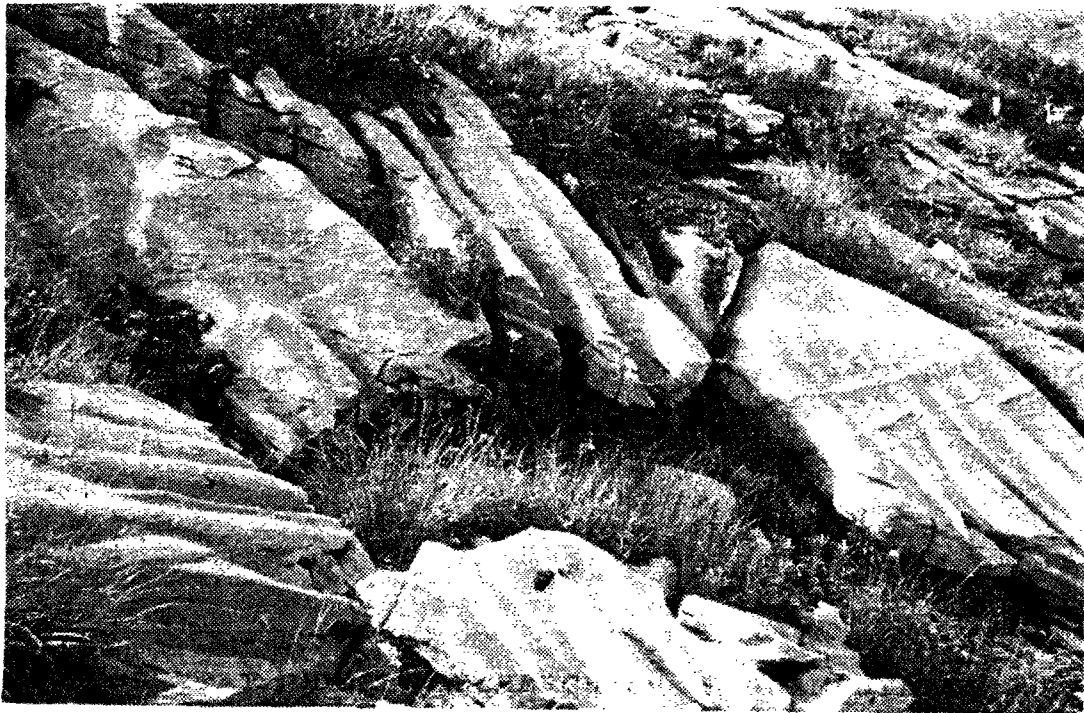


Photo 1 : L'impact du ruissellement en milieu naturel -
Désert du Platé - Alpes, altitude 2 300 m -
Ecoulement de l'eau et dissolution du calcaire

2 - RUISSELLEMENT ET RISQUE MAJEUR

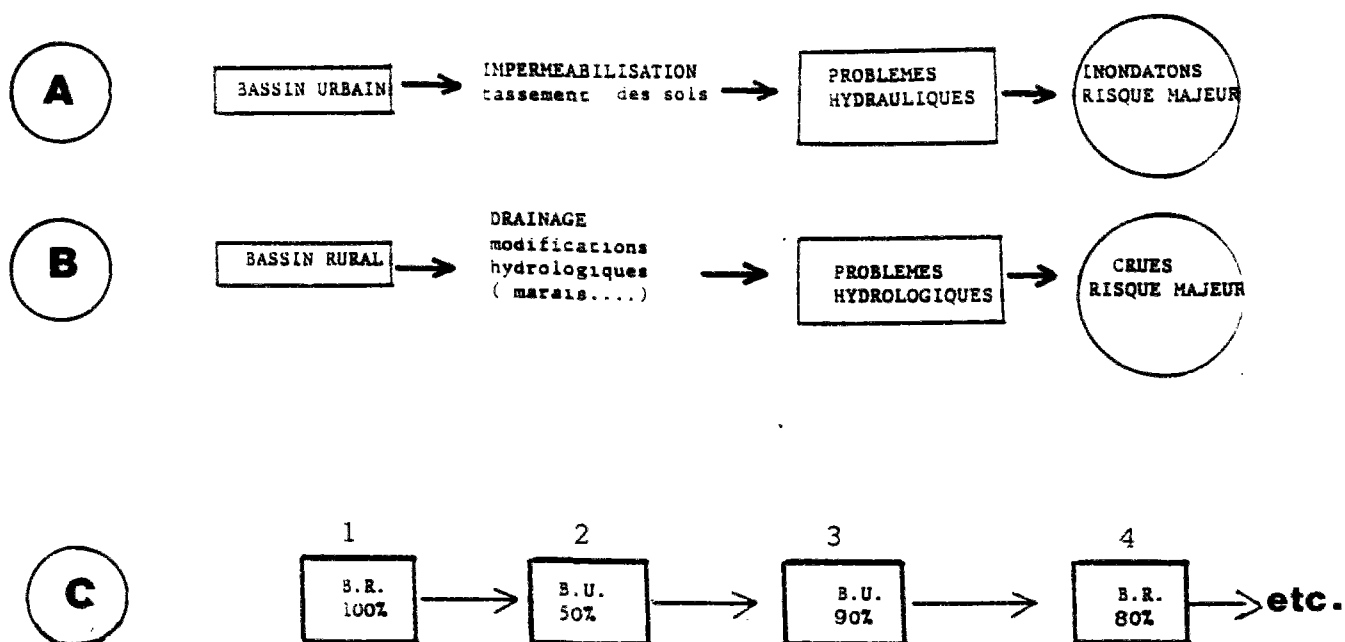
L'objectif de la présente thèse est l'étude du phénomène du ruissellement dit exceptionnel et à risque majeur issu des aménagements et des activités humaines, ruissellement exceptionnel car il est lié à de fortes précipitations d'occurrence comprises entre le risque décennal et le risque centennal.

Nous allons étudier si ce risque majeur est généré par des lieux anthropisés aussi bien urbains que ruraux.

Le degré de risque du ruissellement semble être lié aux MODIFICATIONS de l'existant. Ce degré du risque varie en fonction du degré de l'urbanisation, de la déforestation, de la dévégétalisation, de la mécanisation agricole et des nouvelles pratiques culturelles.

Bien que le monde agricole en France refuse de reconnaître toute participation dans l'amplification actuelle du risque inondation de l'aval par l'apport du ruissellement agricole, le degré de risque du ruissellement semble aussi être lié à la présence d'un environnement vulnérable (urbanisation des lits majeurs des rivières, des torrents et des ravins).

Organigrammes



- (1) B.R. = Bassin versant rural perméable à 100%
- (2) B.U. = Bassin versant urbain imperméable à 50% (amont)
- (3) B.U. = Bassin versant urbain imperméable à 90%
- (4) B.R. = Bassin versant rural perméable à 80% (aval)

Figure 2 : Organigrammes : les différents éléments d'un bassin-versant

3 - DEFINITION DES SECTEURS SOUMIS AU RUISSellement

Jusqu'ici les études et recherches ont abordé le problème du ruissellement de façon très parcellaire. Soit les études s'appuyaient sur des analyses en milieu urbain, avec l'imperméabilisation des sols, soit les études analysaient le ruissellement en milieu rural, avec l'évolution des techniques de drainage et d'irrigation (figure 2).

On démontrera que cette séparation est tout à fait théorique, pour la facilité de la recherche ; mais, en fait, sur le terrain, le ruissellement à risque majeur est l'addition de toutes les sources de ruissellement, le ruissellement d'origine agricole et forestière et le ruissellement d'origine urbaine.

Pourquoi, sur le terrain, la séparation entre les deux sources de ruissellement n'existe-t-elle pas ?

Parce que le bassin-versant traversé par un ruissellement, quelle que soit sa taille, est formé dans notre pays de surfaces mixtes rurales et urbaines avec un pourcentage de répartition variable et une répartition spatiale en séries, de type "ruissellement rural, ruissellement urbain, ruissellement rural".

Le bassin versant, support du ruissellement, est l'unité géographique qui peut donner l'échelle du risque. La déclivité d'un bassin versant permet aux eaux tombées de "ruisseler" et de se concentrer en un point, toujours le même, appelé l'exutoire du bassin. Cet exutoire peut être le point bas de la ligne de plus grande pente du bassin ; il peut recréer un ruissellement dans un bassin versant inférieur jusqu'à la rencontre finale d'une rivière en eau ou d'un réseau d'assainissement.

4 - DESCRIPTION DU PHENOMENE

Peu de recherches se sont intéressées au phénomène global du ruissellement. Par contre, on trouve de très nombreuses études sur les CONSEQUENCES du ruissellement et sur ses TRACES. Ces études touchent les domaines de l'érosion, des inondations, des glissements de terrain, de la sédimentation, etc.

D'autres études ont abordé les ORIGINES du ruissellement dans le cas des sols saturés. Il y a RUISSellement DE SATURATION lorsque les sols imbibés d'eau "rejetent" de l'eau et refusent l'infiltration de l'eau de surface, suite aux remontées des nappes phréatiques.

Cette explication du ruissellement n'est que partielle et nous l'aurions volontiers suivie s'il n'y avait eu l'évènement de Narbonne en septembre 1989, où une lame d'eau de ruissellement s'est constituée sur des sols complètement desséchés pour traverser en trombe la ville avec une hauteur d'un mètre.

Deux remarques succinctes se présentent à nous pour expliquer la rareté des études sur le phénomène du ruissellement :

- en premier lieu, le phénomène du ruissellement est un phénomène extrêmement RAPIDE ET EPHEMERE. La proportion de chercheurs et d'ingénieurs qui se sont trouvés sur son passage in situ est faible.

En dehors des problèmes courants de ruissellement rencontrés sur les grands chantiers de Génie civil, nous avons pu vivre le sinistre parisien du 27 Juin 1990, en liaison avec une station météorologique. Lors de cet événement, la lame d'eau de ruissellement s'est formée 7 à 10 minutes après le début de la pluie ; elle a suivi les voies publiques, au point bas géographique de chaque secteur ; et elle a disparu 5 minutes après l'arrêt des pluies. L'évènement a duré 30 à 45 minutes suivant les lieux ;

- comme seconde explication de la faible quantité de recherches sur le sujet, nous avons remarqué la grande capacité du milieu naturel à résorber l'évènement d'un ruissellement exceptionnel.

Le ruissellement exceptionnel ou risque majeur laisse peu de traces sur le milieu naturel. Les végétaux (arbres et arbustes) se redressent après l'évènement, ainsi que les graminées si l'évènement a été bref (moins d'un jour). Même pour Nîmes, les végétaux n'auraient pas souffert si les eaux avaient pu "sortir" de la ville, les lames de ruissellement ayant duré entre 5 et 7 heures, durée qui, dans le monde végétal représente une submersion passagère et sans risques de détérioration (la figure 3 indique les durées maximales tolérables de submersion pour certains végétaux).

Le ruissellement exceptionnel laisse aussi peu de traces sur les sols naturels. L'érosion des terres végétalisées s'est trouvée très minime après les événements de Nîmes ou du Grand-Bornand. Seules les rives des talwegs ont été érodées et qui plus est ponctuellement.

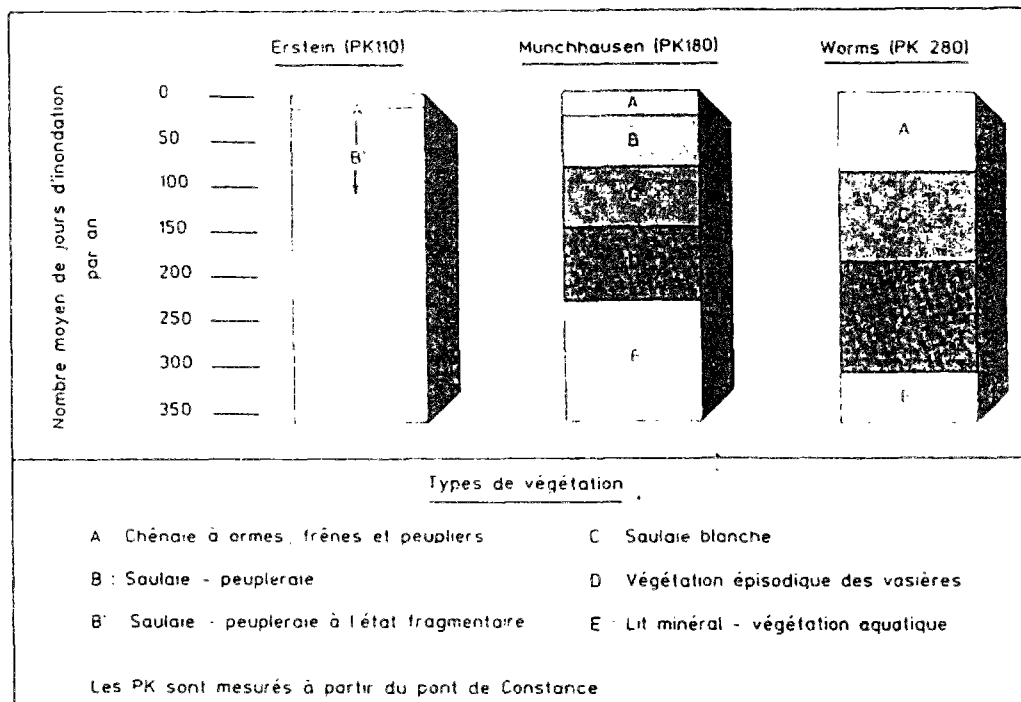
Par contre, en milieu urbain, les conséquences du passage d'un ruissellement exceptionnel sont destructives. Après le passage de la lame d'eau, il y a les boues, la marque des traces de laisses sur les édifices, le déchaussement des chaussées, les risques d'effondrement du bâti, les destructions des réseaux souterrains et les conséquences de l'humidification passagère sur tous les biens, sans parler des morts.

C'est comme si le rétrécissement des passages des écoulements des eaux, où l'impossibilité de passage, transformaient le ruissellement naturel en risque gravissime.

Les catastrophes de Nîmes (1988) et de Vaison-la-Romaine (1992) ont cristallisé l'opinion et les chercheurs. A notre actif, nous rappelons que nous avons soutenu le mémoire de D.E.A. "Ruissellement, sol et végétation dans les travaux d'infrastructure" 15 jours avant la catastrophe de Nîmes, après avoir constaté le peu d'intérêt des responsables pour ce sujet pendant l'année précédente.

Les études sur le phénomène du ruissellement ne commencent donc à voir le jour en milieu urbain qu'à cause des coûts financiers qu'il entraîne et des accidents mortels qu'il provoque.

Un dernier constat sur le phénomène du ruissellement est qu'il entraîne la destruction de biens publics et para-publics (PTT, SNCF, DDE, EDF ...). Les coûts des sinistres PUBLICS sont démesurés et surprennent tous les corps d'état, d'autant plus que la lame d'eau du ruissellement exceptionnel emprunte des chemins d'écoulement qui correspondent au domaine public (chemins, routes, assainissement, rivières sèches ...), ce qui interpelle tous les aménageurs, décideurs, constructeurs, ingénieurs.



- Durées d'inondation et végétation correspondante sur le Rhin supérieur, d'après les travaux de Carbiener, Dillmann et Dister (Par exemple, le haut de la Saulaie blanche - C - est inondé 80 jours à Munchausen, 90 jours à Worms, le bas 150 jours à Munchausen, 190 jours à Worms, le haut du lit minéral - E - 230 et 310 jours, le bas toute l'année.)

Figure 3 : Degrés des possibilités d'immersion des végétaux
Etude d'impact de l'écrêtement des crues du Rhin de 1986
Laboratoire des Ponts et Chaussées de Strasbourg [40]

5 - L'AMPLIFICATION ET LA TRANSFORMATION DU PHENOMENE DU RUISSellement EN RISQUE MAJEUR

Historiquement, l'amplification du phénomène du ruissellement est un événement récent. Les premières réactions en France face à ce risque datent de 1970, soit deux décennies : 1970 pour le Service Départemental d'Assainissement de la Seine-Saint-Denis, et 1974 pour la première thèse sur "les méthodes de calcul du réseau urbain d'assainissement pluvial" de M.DESBORDES.

A l'étranger, la déforestation du Népal par de puissants moyens provoque les inondations répétées au Bangladesh. Au Japon, la ville d'Osaka a été inondée en août 1982 par des eaux de ruissellement générées par les districts nouvellement urbanisés (30 000 maisons inondées).

Et pour la France, les événements du Grand-Bornand, de Nîmes, de Narbonne, de Paris, de Vaison-la-Romaine, etc., font date dans l'histoire des inondations par ruissellement, avec ou sans débordements de rivières.

- La première question que l'on peut se poser est de savoir à partir de quel moment le ruissellement peut devenir une source de risques, de catastrophe naturelle ?

Il semblerait que la transformation du phénomène naturel du ruissellement en risque majeur soit liée à toute MODIFICATION DE L'EXISTANT, rural et urbain, aussi bien dans les modifications apportées aux surfaces de ruissellement, que dans les modifications apportées au parcours du ruissellement.

- La deuxième question serait de savoir si le risque du ruissellement est pris en compte en France en 1993 ?

A vrai dire, lors de nos prospections en 1990, nous avons découvert le peu d'intérêt pour cette question, les gens pensant qu'elle était réglée.

Pourtant, nous avons constaté que les documents de l'enquête publique concernant la modification du schéma Directeur d'aménagement et d'urbanisme de la Région Parisienne, présentés à la Sorbonne le 26 Mars 1990 en séance publique*, ne comportaient aucune mention sur les eaux de ruissellement des nouveaux secteurs en voie d'urbanisation, pas plus que de prévisions pour l'évacuation des eaux pluviales (des toitures et voiries) sinon qu'elles étaient destinées aux stations d'épuration existantes largement saturées telle celle d'Achères.

* voir le compte-rendu de l'article du journal "Le Monde" du 28 Mars 1990 de Charles Vial "Débat sur le Livre Blanc de l'Ile-de-France".

Nous avons donc vu que les contraintes hydrogéologiques sur l'extension de la capitale étaient absentes des documents, donc non traitées, et ne semblaient être qu'une question tout à fait secondaire dans les réponses de la séance publique.

Pour ce qui est de l'évènement parisien du 27 Juin 1990, la plupart des Services Publics et concessionnaires de réseaux touchés par la catastrophe ne jugent toujours pas opportun de placer les risques de ruissellement dans leurs préoccupations, malgré l'évènement.

Il semblerait logique que l'intérêt porté à ce phénomène soit proportionnel aux montants des dégâts ; mais il n'en est rien, même si la destruction des biens et d'ouvrages publics est en première ligne face au risque du ruissellement, avec l'interruption ou la destruction de réseaux d'assainissement, de routes, d'éclairage public, de téléphone, etc.

La sensibilisation pour des moyens défensifs contre ce risque est donc l'un des objectifs de notre travail.

6 - L'ETAT DES RECHERCHES FONDAMENTALES SUR LE RUISSellement

En première partie de ce mémoire, sont détaillées les études et recherches fondamentales sur le ruissellement et le ruissellement risque majeur qui sont connues à ce jour.

La France, la Suisse, le Canada, l'Angleterre, les U.S.A., l'Australie, les pays du Benelux, l'Allemagne, l'Autriche, le Japon sont les principaux pays à traiter de la question du ruissellement à risque.

De cette prospection, il ressort que la recherche se situe à trois niveaux :

1. le niveau du laboratoire, avec des essais simplifiés,
2. la simulation mathématique,
3. les expériences de terrain ("IN SITU") avec observations de nombreux paramètres naturels, associées à la présence de relevés systématiques.

Plusieurs services français autres que les organismes de Recherche (Cergrene, CNRS, LCPC, L.H.M....) participent à la lutte contre le risque du ruissellement. Ce sont :

- les services du Ministère de l'Environnement, notamment la Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques, et la Délégation aux Risques Majeurs (D.R.M.),

- les services du Ministère de l'Agriculture, de la Restauration des terrains en Montagne (R.T.M.) et de l'Office National des Forêts (ONF),
- l'Association des Maires de France, ainsi que la "Fondation nationale pour la prévention des risques naturels" qui décerne chaque année des prix aux municipalités qui se sont penchées sur la prévention et la lutte contre les risques majeurs.

7 - DES EXEMPLES DE SINISTRES LIES AU RUISSELLEMENT

En deuxième partie et comme support de notre mémoire, nous avons choisi quatre sinistres récents, pour mieux cerner le processus du ruissellement risque majeur et établir les rapprochements qui s'imposent.

Nous avons utilisé le terme de "crue centennale" dans son sens générique, pour la simplification de la définition du risque, en nous appuyant sur le fait que la période de retour des quatre catastrophes est estimée de façon très diverse (fiches descriptives des catastrophes chapitre 2).

Les catastrophes choisies ont été retenues en fonction de la différence des situations (géographique, urbanistique, climatologique) et en fonction de l'importance des dégâts.

Ce sont les événements suivants:

- l'évènement du village du Grand-Bornand du 14 juillet 1987, en milieu alpin et rural, survenu en période à pluviométrie normale estivale,
- l'évènement de Nîmes du 3 octobre 1988, en milieu mixte rural et urbain, survenu en période pluvieuse exceptionnelle,
- l'évènement parisien du 27 juin 1990, en milieu urbain, survenu en période de sécheresse,
- les événements de Vaison-la-Romaine et Bédarrides du 22 septembre 1992, en milieu de petite montagne et de plaine, survenus en période pluvieuse exceptionnelle.

Pour cela, nous avons étudié les rapports de mission d'enquête, les rapports de commission, interviewé des rapporteurs, visité les sites, et rendu visite à des organismes ayant eu à gérer les crises, en particulier la protection civile et les pompiers.

Nous essayerons de tirer une première série de réflexions sur la base des anomalies et similitudes apparues dans le déroulement de ces catastrophes.

8 - FACTEURS AGGRAVANTS ET LIMITANTS ET TECHNIQUES DE LUTTE URBAINE CONTRE LE RISQUE MAJEUR DE RUISSELLEMENT

Le recoupement des similitudes et des anomalies des catastrophes analysées fait apparaître une série de facteurs aggravants et limitants au niveau de la législation, au niveau des facteurs géomorphologiques et au niveau des facteurs anthropiques, que nous étudierons au chapitre 3.

Les facteurs aggravants correspondent à l'urbanisation après la deuxième guerre mondiale, aux modifications du paysage, etc. Les facteurs limitants répondent plutôt à des techniques de lutttes ancestrales que l'on a pu découvrir par l'observation de terrain.

Les techniques de lutte contre le ruissellement risque majeur s'appuient donc sur une infinité de procédés soit à court terme, soit à long terme, allant d'investissements légers à des investissements importants, dans les domaines de l'urbanisme, de l'architecture, du paysage et de l'infrastructure.

9 - ELABORATION D'UNE MÉTHODE POUR LE CONTRÔLE DU RISQUE MAJEUR DE RUISSELLEMENT

Le chapitre 4 nous amène vers une approche méthodologique de la diminution du risque. En prenant comme données d'une part les études hydrauliques d'estimation de débits de crues, d'autre part les relevés de traces de laisses de crues sur les constructions, en nous appuyant sur de nombreuses observations que nous avons faites sur le terrain avec la simulation de la crue, tant sur les parcelles de centre-ville que sur les parcelles péri-urbaines, et en utilisant les planches cadastrales, nous arrivons à estimer une diminution du risque par les techniques proposées.

Cette diminution du risque passe non seulement par des techniques appropriées, mais aussi par la participation des Services Techniques Municipaux associés aux services des sapeurs-pomiers, des R.T.M. et de l'O.N.F.

10 - LES METHODES DE PREVISION, DE DETECTION ET DE PROTECTION DU RISQUE DE RUISSELLEMENT DANS DIFFERENTS PAYS

En annexes 1 et 2, nous abordons la gestion du risque du ruissellement par différents Services d'Etat et dans plusieurs pays.

Nous avons choisi comme pays la France et la Confédération Helvétique.

Les Services retenus et que nous remercions pour leur collaboration sont les suivants :

- le Service de la Direction de l'Eau et de l'Assainissement (D.E.A.) du Conseil Général du Département de la Seine-Saint-Denis (France), Mme COGEZ, M. BREUILLE, Mme PEREZ ;
- le Service Cantonal des Améliorations Foncières du canton de Vaud (Suisse) M.JATON ;
- le Service des Eaux et de la Protection de l'Environnement de Lausanne (Suisse) M.MATTHEY ;
- L'Institut du Génie Rural de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (E.P.F.L.) (Suisse) M. le Professeur MUSY et M. CONSUEGRA ;

D'autres Services, tel l'institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région Parisienne (I.A.U.R.I.F.), M. DELAVIGNE, nous ont aidé à poursuivre notre étude.

a - Les méthodes d'anticipation sur les phénomènes

En analysant les méthodes de travail face à un ruissellement risque majeur, en France et Suisse et en Grande-Bretagne, nous avons rencontré des différences de calcul et de résultats (figure 4) :

- les méthodes françaises établissent leur calcul à partir des PLUIES, et travaillent beaucoup par modélisation mathématique avec une évaluation du coefficient de ruissellement. Seuls les services R.T.M. ont une pratique exclusive de terrain ;
- les méthodes helvétiques établissent leur projet à partir du DEBIT DES CRUES et couplent leurs expériences de terrain avec une prévision mathématique ;
- les méthodes de travail britanniques sont inspirées des analyses géomorphologiques. De plus, elles s'appuient sur une très forte participation locale par l'intermédiaire d'enquêtes.

Ces pays se retrouvent devant le même problème : comment assurer un contrôle du risque du ruissellement.

L'analyse des différentes méthodes de travail concernant l'anticipation des phénomènes conduira à parler de leurs avantages, de leurs inconvénients, des résultats obtenus et des intérêts que nous pouvons en retirer pour notre pays, en complément ou en remplacement de nos méthodes de prévision.

b - LES METHODES DE DETECTION

Les méthodes de détection à très court terme du risque de ruissellement sont à l'heure actuelle du seul ressort des services de METEOROLOGIE.

Nous avons pu voir que la Météorologie Nationale, pour la France, avait eu une possibilité d'alerte pour les sinistres étudiés : Paris, Nîmes, Le Grand-Bornand.

Les trois pays analysés -(France, Suisse, Grande-Bretagne)- ont une très forte unité de travail ; ils sont couplés au niveau de la météorologie internationale. L'organisation météorologique mondiale (O.M.M.) se trouve à Genève et prend de plus en plus de décisions communes concernant la détection des événements naturels et l'information des intéressés transfrontière.

c - Les techniques de protection

Nous avons complété la recherche par comparaison des techniques de protection dans les deux pays : la France (annexe 1) et la Confédération Helvétique (annexe 2).

Ce sont des techniques déjà connues et courantes de gestion du ruissellement. Pour la défense contre le ruissellement risque majeur, les études des techniques de protection sont en cours de mise en oeuvre. La Suisse a retenu une gestion artificielle du niveau de ses lacs pour gérer le problème du ruissellement, ce qui indique l'échelle du risque.

11 - CONCLUSION

Notre recherche se veut globale et pluridisciplinaire car le ruissellement touche de nombreux secteurs agricoles, forestiers et urbains.

Nous n'avons pas abordé l'impact de la dérive climatique actuelle sur le ruissellement, les modifications anthropiques du milieu existant semblant de loin prédominer en 1993.

Notre mémoire, en mettant l'accent sur les pratiques actuelles de gestion du ruissellement, espère seulement apporter des indications pour la défense contre le ruissellement et inciter les recherches de protection et de rétention.

Car les inondations par ruissellement sont aussi fréquentes et graves pour l'économie nationale que les inondations par débordements des rivières.

Nous remercions l'agriculteur pédagogue qui a osé nous dire "les crues, on s'en moque", à propos des crues que les agriculteurs provoquent par l'intensification de leur drainage et les modifications de leurs pratiques culturales.

Nous constatons aussi que le temps nécessaire à la lutte contre le ruissellement ou à sa non-génération est à une grande échelle. 20 ans n'ont pas suffi à une D.D.E. pour mener à bien la gestion du ruissellement dans son département et la protection au risque, obtenue au bout de 20 ans d'efforts, n'est qu'une protection d'occurrence quinquennale (± 5 ans).

Mais le risque demeure et qui plus est persiste même en période de sécheresse. Nous ne pouvons donc pas l'ignorer, l'oublier ou le sous-estimer.

Il nous apparaît qu'il ne peut y avoir planification urbaine sans gestion du ruissellement et planification agricole sans regroupement des effets du ruissellement.

Nous sommes heureux de constater que les recherches sur la question se développent dans tous les secteurs (Cergrene, Universités de Paris I, IV, VII, Ecole d'Horticulture et du Paysage de Versailles, etc.).

Le risque du ruissellement existe depuis longtemps. Les services de la R.T.M., depuis 1880, avaient eu à le gérer. La nouveauté c'est de retrouver le risque partout et en milieu urbain, même en plaine et dans des régions peuplées avec des réseaux d'assainissement insuffisants, au Sud de la France comme au Nord⁽¹⁾ et en période de fortes précipitations comme en période de sécheresse⁽²⁾.

La mémoire de l'eau semble être plus forte que la mémoire de l'homme.

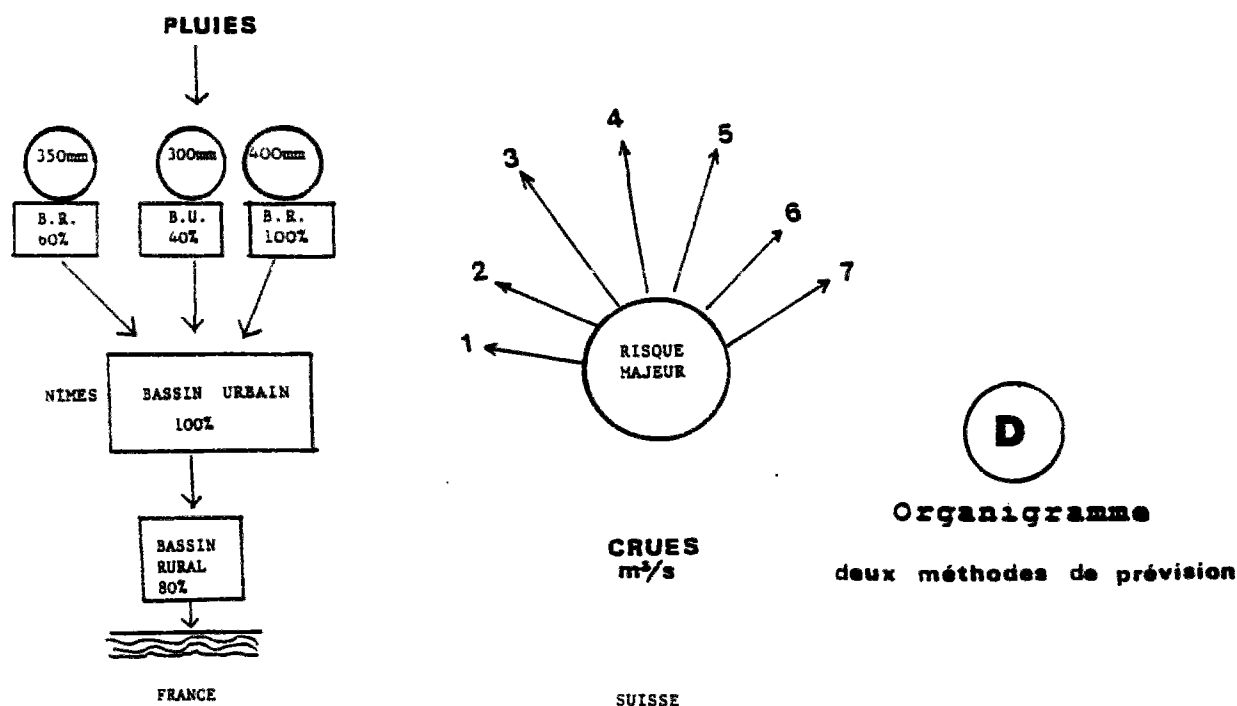


Figure 4 : Organigramme - Deux méthodes de prévision : Suisse, France

(1) Evènement de Douai de Septembre 1990

(2) Evènement de Narbonne de Septembre 1989

PREMIER CHAPITRE

ETAT DES RECHERCHES SUR LE RUISSellement

Pages

Ce chapitre comprend cinq parties :

1.1- Les sources de documents	21
1.2- L'origine du ruissellement	29
1.3- La prévision du ruissellement	57
1.4- La protection contre le ruissellement	97
1.5- L'état de la législation	123

1.1 - LES SOURCES DES DOCUMENTS

1.1.1. GÉNÉRALITÉS

Les documents sur le ruissellement et le ruissellement risque majeur se sont avérés très disséminés et disparates, allant de quelques feuillets à des livres complets.

C'est sans doute dans la bibliothèque de l'A.F.E.E.⁽¹⁾, maintenant à Limoges, que nous avons trouvé le plus grand nombre de textes concernant le ruissellement.

En 1989, seules trois bibliothèques mentionnaient le terme de "ruissellement", celles du L.C.P.C., de l'A.F.E.E. et du programme "Man and Biosphere" (M.A.B.)⁽²⁾ de l'UNESCO ; les autres bibliothèques ne connaissaient pas le terme de ruissellement.

(1) A.F.E.E. : Association Française pour l'Etude des Eaux
21 rue de Madrid 75008 PARIS

(2) M.A.B. : Mand and Biosphere
UNESCO - 7 place Fontenay 75007 PARIS

1.1.2. LES LIEUX

La recherche bibliographique a été menée dans plusieurs établissements :

• DEUX LIEUX PRINCIPAUX :

- le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, où nous avons consulté la bibliothèque, les rapports d'enquête administrative sur les catastrophes et le réseau PASCAL (Banque de données du C.N.R.S.) ;
- l'Association Française pour l'Etude des Eaux (A.F.E.E.), avec sa bibliothèque de 110.000 documents sur l'eau, dont 30 % en français et 65 % en anglais. Ces documents proviennent pour l'essentiel des U.S.A., de Grande-Bretagne, du Canada, des Pays-Bas, d'Australie, de Suisse et de France. L'A.F.E.E. dispose également d'une base de données bibliographiques implantée sur le serveur de l'Agence Spatiale Européenne (E.S.A.) et accessible par TRANSPAC. Depuis 1992, l'Office International de l'Eau regroupe l'A.F.E.E., la Fondation de l'Eau et le CEFIGRE⁽¹⁾ à Limoges, où se retrouvent donc les documents. L'interrogation pour la documentation technique peut se faire par le "36.17 Eau Doc".

• AUTRES LIEUX :

- l'Agence de Bassin de Seine-Normandie à Nanterre,
- la bibliothèque de l'E.N.G.R.E.F., avenue du Maine à Paris,
- l'I.A.U.R.I.F. (réseau ECOTHECK),
- le programme "Man and Biosphere" de l'UNESCO,
- le S.T.U. (Service Technique de l'Urbanisme).

1.1.3. LES MOTS-CLÉS

Le thème du ruissellement correspond généralement dans les fichiers à un très petit nombre de documents, nous avons élargi notre recherche sur le ruissellement aux thèmes suivants : infiltration, érosion, prévision météorologique.

Le thème "inondation par ruissellement" s'est avéré absent (Dammage flood Runoff Water).

Les mots-clés qui nous ont aidés pour couvrir ce thème sont les suivants : bassin de rétention, bassin d'orage, retenue collinaire, filet d'eau, nappe d'eau, rigole, ... (basin discharge, lake storage, hill dams, mill-wash, sheet-wash, gully, ...).

• Une recherche systématique (années 1986-1990) a été menée dans fichiers panoramiques de l'A.F.E.E. sur le thème du ruissellement (articles de revues, études, thèses, recherches).

On y a trouvé principalement des informations sur :

- les rapports entre le ruissellement et l'érosion, abordés sous l'angle géomorphologique, plus que sous l'angle mathématique ;

(1) CEFIGRE : Centre de Formation Internationale pour la Gestion des Ressources en Eaux

- le ruissellement urbain (défenses urbaines) ;
- pour ce qui est de la couverture végétale, les comparaisons des recherches se font entre le sol forestier et le sol dénudé.

Environ 20 % des textes traitent la question du ruissellement de façon mathématique (avec le calcul de la périodicité de retour), 40 % traitent le sujet ruissellement-érosion-pollution. Diverses publications anglaises et américaines analysent le phénomène sous l'angle géomorphologique et arrivent à la conclusion des dégâts en planifiant les zones d'érosion et les zones d'envasement.

1.1.4. LES DOCUMENTS

Les renseignements bibliographiques analysés dans le cadre de nos travaux sont issus de quatre sources principales : les revues scientifiques et techniques, les thèses, les livres, les études et quelques périodiques, d'importance secondaire malgré leur très grand nombre.

1.1.4.1. LES REVUES SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

Elles sont la source d'information la plus importante pour notre recherche malgré leur hétérogénéité. Les pays se préoccupant des problèmes liés au ruissellement risque majeur sont les U.S.A., la Grande-Bretagne, la Suisse, l'Autriche, le Brésil, le Japon.

Comme revues proches de notre thème, nous avons trouvé par ordre d'importance :

- U.S.A. Anglais
 - Journal of Environmental Quality,
 - Technical Bulletin NCASI,
(National Council of the Paper Industry for Air
and Stream Improvement),
 - Environmental Science and Technology,
 - Journal of Water Pollution Control Federation,
 - Water Resources (avec l'American Water Resources
Association),
 - Journal of Water Resources Planning and Management,
 - Irrigation Engineering,
 - Water Resources Research.
- GRANDE-BRETAGNE Anglais
 - Hydrological Processes,
 - Journal of the Institution of Water and Environmental
Management (JIWEN),
 - Environmental Pollution,
 - Environmental Technology,
 - Water Research,
 - Landscape Design.

Tableau 5 : Classification des références bibliographiques par thèmes
Fichiers panoramiques de l'ex-A.F.E.E., maintenant Office
International de l'Eau à Limoges

THEME INONDATIONS Ecrêtement et dommages	FRANCAIS	ANGLAIS	ALLEMAND
1988 24 références	10	13	1
1989 6 références	3	3	-
total 37 références	35%	62%	3%
THEME CRUES Propagation des crues et articles sur les pluies-débits			
1988 114 références	24	88	2
1989 50 références	11	36	3
total 162 références	22%	76%	2%
THEME RUISSELLEMENT			
1988 68 références	17	51	-
1989 39 références	8	30	1
total 107 références	23%	76%	1%

- FRANCE Français
 - La Houille Blanche,
 - Cahiers de l'ORSTOM, série hydrologique,
 - Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées,
 - Société Hydrotechnique de France (Annales des conférences),
 - TSM Techniques et Sciences Municipales,
 - Revue des Agences de Bassin,
 - Annales de Limnologie.

- Puis des revues plus urbanistiques :
 - Annales de la Recherche Urbaine (MULT),
 - Aménagement et Nature,
 - Métropolis,
 - Naturellement.

- PAYS-BAS Anglais
 - Journal of Hydrology,
 - Agricultural Water Management,
 - Journal of Contaminant Hydrology,
 - Irrigation and Drainage Systems.

- CANADA
 - Sciences et Techniques de l'Eau, Français
 - Water Pollution Research Journal of Canada Anglais

- BELGIQUE
 - La tribune du CEBEDEAU Français
 - Annales des Travaux Publics de Belgique

- POURCENTAGE DES REVUES RETENUES
 - en langue française 30 %
 - en langue anglaise 65 %

1.1.4.2. PÉRIODIQUES INTERNATIONAUX

- Aqua,
- ICID (titres + résumés),
- Journal des Sciences Hydrologiques (thèmes),
- UNESCO Nature et Ressources.

1.1.4.3. RAPPORTS ET ÉTUDES

- CEMAGREF - Division Qualité des Eaux de Pêche et Pisciculture, ANTONY,
- CEMAGREF - Division Hydraulique Générale, AIX-EN-PROVENCE,
- O.C.D.E. : Etudes,
- UNESCO - Programme "Man and Biosphere".

Tableau 6 : Différentes rubriques ayant trait au ruissellement
Rubriques du fichier de l'ex-A.F.E.E.

RUISSSELLEMENT	FRANCAIS	ANGLAIS	ALLEMAND	TOTAL
surface imperméabilisée	-	1	-	1
hydrologie topographie	-	5	-	5
pollution	2	5	-	7
géomorphologie	1	5	-	6
photographie aérienne	1	-	-	1
modèle mathématique				
ou géomorphologique	1	6	-	7
déneigement	1	-	-	1
évapotranspiration	-	1	-	1
prédiction par				
météorologie	-	1	-	1
infiltration, sol labouré				
agriculture	-	1	-	1
influence bassin boisé	-	1	-	1
érosion sol agricole				
et maîtrise du				
ruissellement	-	2	1	3
fonte des neiges	-	1	-	1
dépollution ruissellement	1	1	-	2
dépôts dans canalisation				
assainissement	1	-	-	1
Total	8	30	1	39

1.1.5. LES SUJETS TRAITÉS

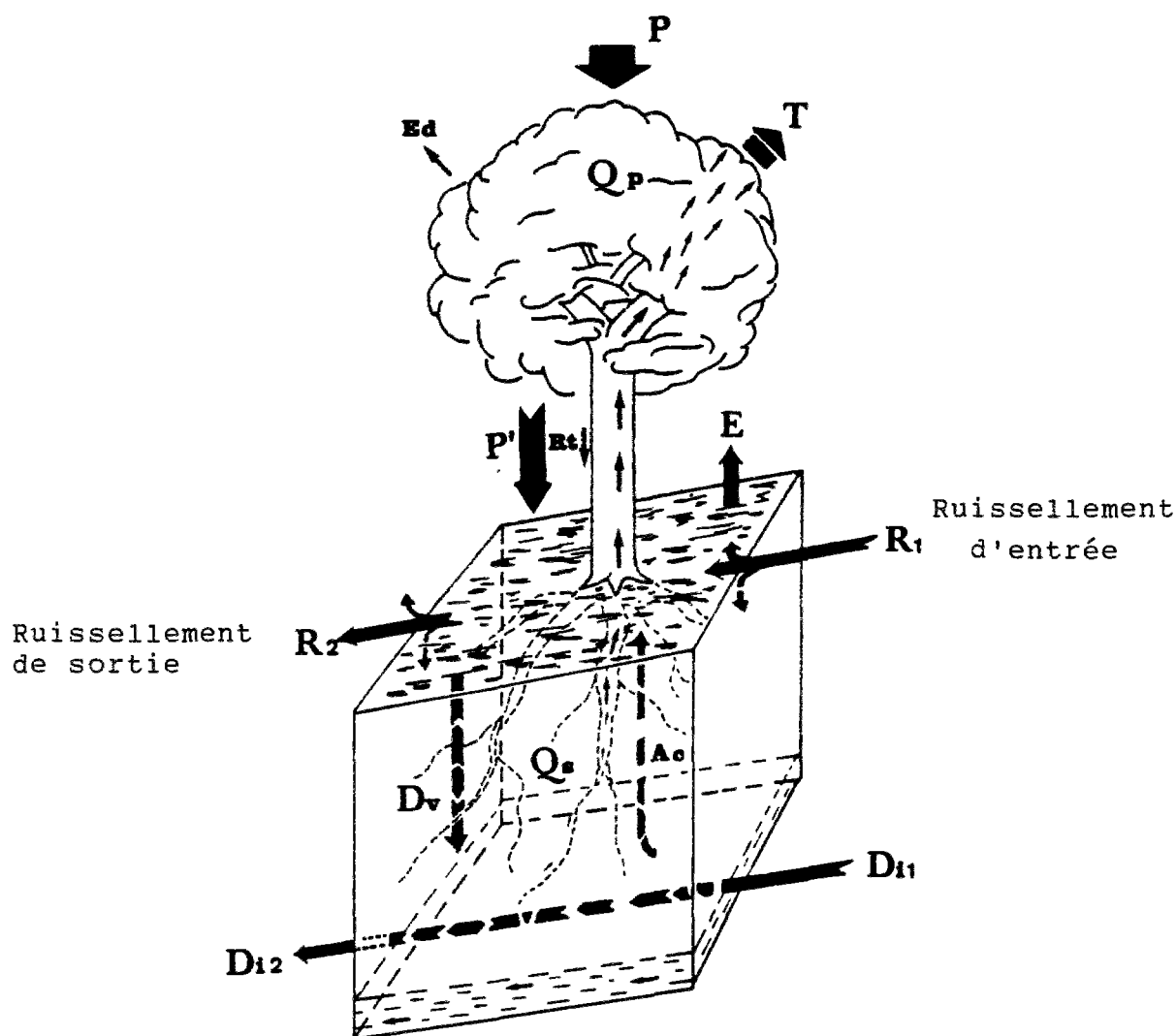
1.1.5.1. LES THÈMES

A titre d'indication, nous donnons dans le tableau 5 une répartition des sujets traités en fonction de l'année, du thème et de la langue, en nous appuyant sur le fichier de l'ex A.F.E.E., maintenant "Office International de l'Eau" à Limoges.

Le pourcentage des références de textes en langue anglaise est globalement deux fois plus important que celui des textes en langue française pour les périodes de référence.

1.1.5.2. LES RUBRIQUES SUR LE RUISSELLEMENT

Les rubriques relevées à l'A.F.E.E. pour l'année 1989 sur le thème du ruissellement sont les suivantes. Nous donnons dans le tableau 6 la proportion entre les divers sujets répertoriés et la répartition entre les trois langues anglais, français, allemand.



Soit :

P = Précipitations
 Ac = Remontées capillaires
 R = Eau ruisselée
 Q_p = Eau stockée dans les végétaux
 Q_s = Eau stockée dans le sol
 $Q = Q_p + Q_s$, Eau temporairement immobilisée
 P' = Eau égouttée
 R_t = Eau ruisselée sur les troncs et les tiges
 Di = Drainage isoclinal
 D_v = Eau infiltrée
 T = Eau transpirée
 E = Eau évaporée
 Ed = Eau immédiatement évaporée

Figure 7 : La part du ruissellement dans le bilan hydrologique hors situation de crise (extrait du Livre de G.RIOU [172])

1.2 - L'ORIGINE DU RUISSELLEMENT

1.2.1. DESCRIPTION DE LA NAISSANCE DU PHENOMENE DU RUISSELLEMENT

Les chercheurs se trouvent devant la difficulté de trouver des définitions claires et simples pour des modalités et des formes de ruissellement qui n'entrent pas dans le cadre d'écoulements mieux connus tels que ceux des eaux des rivières.

Les terminologies pour le ruissellement sont variées ; elles s'inspirent des termes utilisés pour l'érosion. Les expressions "ruissellement diffus" et "ruissellement concentré" sont largement employées pour désigner un écoulement distribué sur une surface assez vaste, ou en rigoles.

Mais le "ruissellement diffus", qui ne peut être assimilé à un ruissellement en nappe, désigne aussi bien les petits filets d'eau circulant sur une prairie que les écoulements beaucoup plus spectaculaires.

Nous rencontrons aussi les termes de ruissellements embryonnaires, en filets, en film, pelliculaires, aréolaires ...

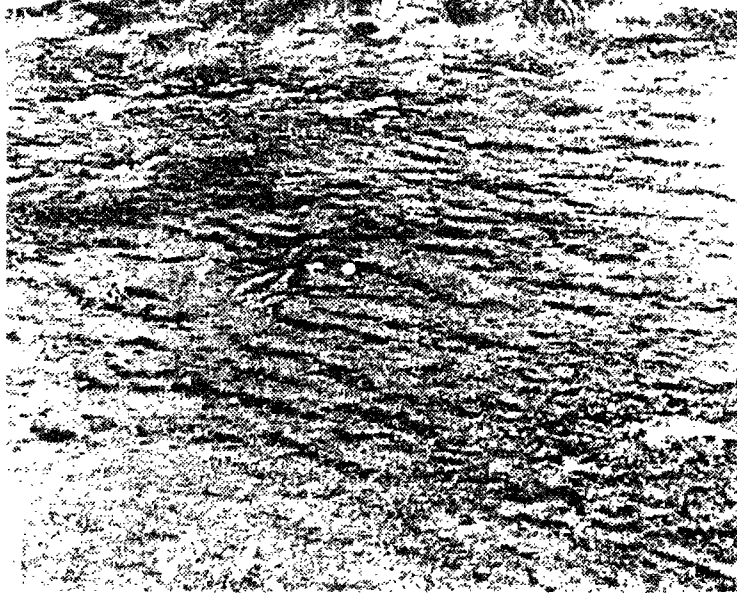
Nous retiendrons, en nous appuyant sur le livre de **G. RIOU** [172] "L'eau et les sols dans les géosystèmes tropicaux" de 1989, les définitions suivantes pour les différents types de ruissellement, sachant que tous ces termes sont calqués sur les recherches sur l'érosion. On peut dire qu'il y a similitude des processus entre l'élément formateur, le ruissellement et l'élément formé, l'érosion (figure 7).

Voici différents types de ruissellement que l'on rencontre :

1.2.1.1. LES RUISSELLEMENTS PELLICULAIRES sont des écoulements de faible épaisseur, lents, non hiérarchisés, aux formes indécises et variables dans le temps et l'espace. Les ruissellements pelliculaires sont en général associés à des pluies de faible intensité et à des pentes faibles.

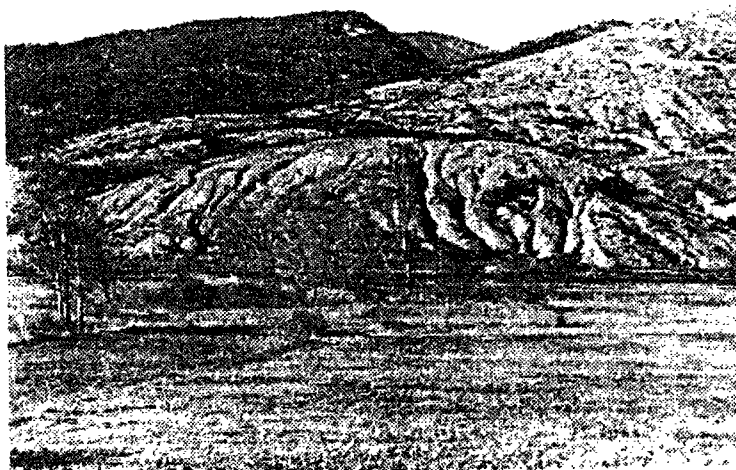
Les ruissellements pelliculaires sont hiérarchisés en trois sous-types :

- les écoulements embryonnaires : ruisselets assez larges (5 à 80 cm) et peu épais (2-3 cm) lents, anastomosés et instables. Ils représentent un stade préliminaire de l'écoulement en nappe ;
- le ruissellement diffus (rill-wash), qui désigne un écoulement en petits filets d'eau, anastomosés, circulant parfois rapidement entre les obstacles. Il exerce une indiscutable action de "lavage", entraînant les fines, déchaussant les touffes d'herbes. Il se rencontre surtout dans la végétation herbacée dense (photo 8a) ;



a- Balayage généralisé par ruissellement diffus, Mt. Crampthorne (Australie Occidentale). Cliche J. T. CCLXXIV-6.

"des mousses entravent l'évacuation des matériaux et provoquent leur accumulation en petites marches d'escalier"



b- Surface-seuil de ruissellement concentré, région d'Antofagasta (Chili Septentrional). Cliche J. Tricart.

Figure 8- a- Ruissellement diffus

b- Ruissellement concentré

(Extraits de J. Tricart [1966] "Précis de géomorphologie")

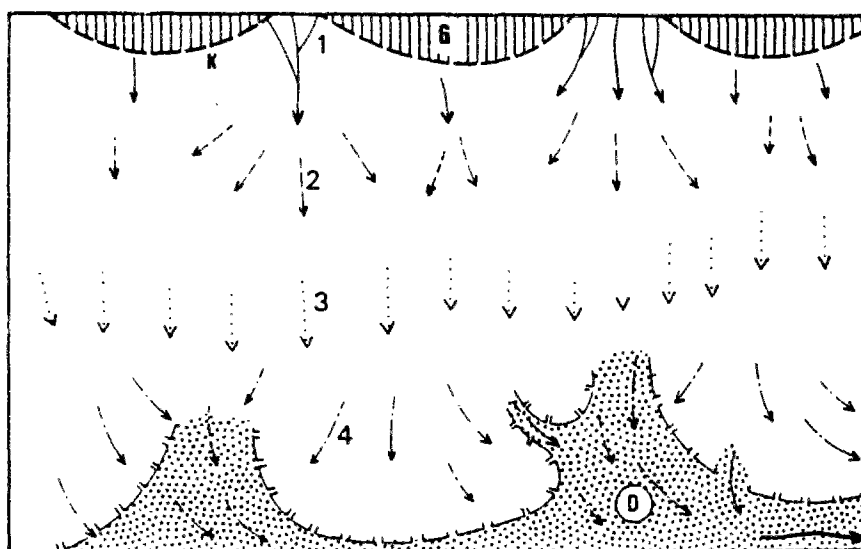
• les écoulements aréolaires (sheet-wash) : désignent des ruissellements en film ou en nappe de faible épaisseur de quelques centimètres qui se forment sur des surfaces restreintes (ares, hectares) généralement dépourvues de végétation. C'est un écoulement caractéristique de zone dégradée à faible pente qui se déclenche avec des intensités de pluies moyennes, en fonction du blocage de l'infiltration.

On ne doit pas sous-estimer le RISQUE de ce ruissellement qui crée une érosion par ablation lente du plancher, après franchissement de la limite de liquidité⁽¹⁾ sur quelques millimètres d'épaisseur, et une érosion latérale qui fait reculer les micro-marches.

1.2.1.2. LES RUISSELLEMENTS CONCENTRÉS

Les ruissellements concentrés rassemblent, à diverses échelles, les entailles les plus bénignes, les rigoles élémentaires et les ravins gigantesques. En suivant la classification établie pour l'érosion, selon les critères internationaux (revue du Courrier de l'Unesco [71]), nous obtenons pour le ruissellement la classification suivante :

- le ruissellement en rigoles (figure 9) : les rigoles sont des incisions élémentaires, temporaires, qui apparaissent durant une averse à la suite d'une concentration locale de l'eau canalisée
 - . par le micromodelé préexistant,
 - . par le réseau des arbustes ou des touffes de graminées,
 - . ou par les façons culturales (labours ou billons placés dans le sens de la pente).



— Schéma d'un glacis de piémont, développé à l'aval d'un relief de commandement (G) et de la rupture de pente (K).

- 1 : écoulement en rigoles et ravins hiérarchisés.
- 2 : écoulement divergent, en rigoles plus ou moins anastomosées et en nappe.
- 3 : écoulement en nappe.
- 4 : écoulement multiforme (nappe, rigoles, ravines).
- D : Axe de drainage principal.

Figure 3 : Transcription graphique de divers types de ruissellement sur un relief précis (extrait du livre de G. RIOU [172])

Les dimensions des rigoles sont modestes, quelques centimètres à 50 cm pour la profondeur, quelques décimètres à 2 m pour la largeur.

L'entaille de la rigole dépend de la pente, de la vitesse d'écoulement, mais surtout du binôme intensité de la pluie/densité du couvert végétal. Les fortes pentes donnent des profils en V, ainsi que les pentes moins fortes en zone plus humide ; les pentes faibles donnent des profils en U dans les zones plus arides.

Le tracé des rigoles est plus révélateur des dynamiques en jeu (figure 10). Les réseaux anastomosés sont les plus classiques et correspondent à un balayage du secteur ; les rigoles parallèles se développent sur les pentes fortes et sont l'indice d'une reprise d'érosion ; les réseaux hiérarchisés correspondent à une érosion verticale et une stabilisation des entailles, qui passent au stade de ravines. Ils peuvent apparaître suite à un événement pluviométrique exceptionnel ;

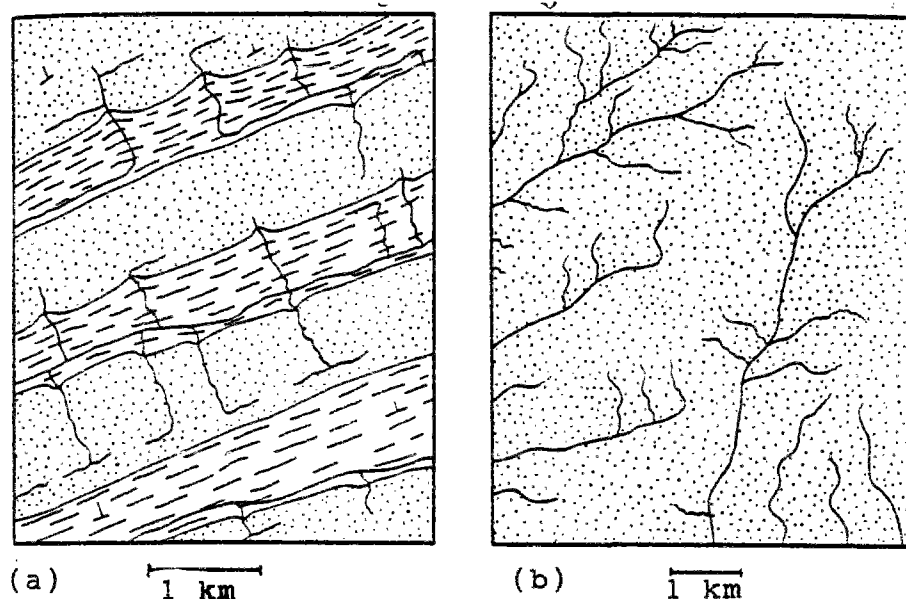
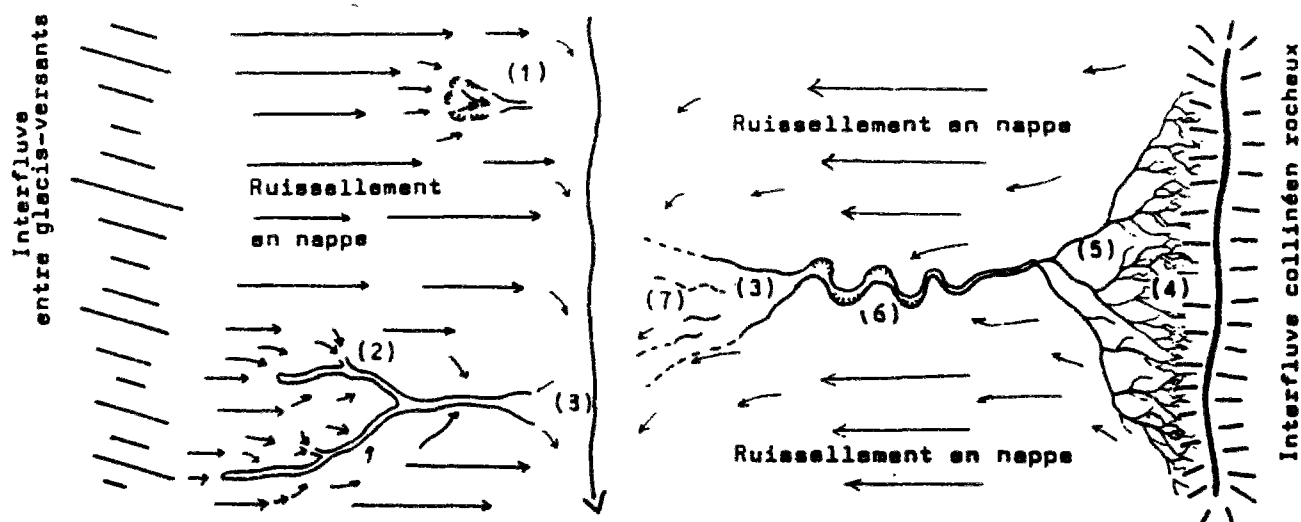


Figure 10 : Schématisation de deux types de drainage naturel
a- en rigoles parallèles (treillis drainage Pattern)
b- en réseaux anastomosés (dendritic drainage Pattern)
(extrait du "Handbook of Applied Hydrology" dirigé par VEN
TE CHOW, paragraphe 4.I) [189] de B.MAXEY, chercheur et
professeur de Géologie et d'Hydrologie
Université de NEVADA (U.S.A.)

• le ruissellement en ravines : ce type d'entaille témoigne d'une agressivité supérieure de l'eau, que la concentration soit plus forte ou la vitesse plus grande ou une quantité d'eau plus importante s'écoule sur une durée plus longue. Les ravines sont souvent localisées au pied des pentes et dans les zones fortement dégradées si la pente est suffisante (figure 11) ;



- (1) Entaille de rupture d'équilibre local.-(2) Ravine de raccordement de la nappe sur le ravin, base éventuelle d'une nouvelle branche du ravin.-(3) Zone d'étalement de la crue, écartement des berges.-(4) Rigoles anastomosées puis hiérarchisées.-(5) Ravines bien entaillées.-(6) Ravin à méandres avec rives concaves et convexes.-(7) Les berges s'affaiblissent et le flux de crue se confond avec les apports de la nappe.

A gauche, le ravin est associé à un ruissellement en nappe, dont d'ailleurs il dérive. La petite entaille de rupture d'équilibre (1) se transforme en ravin en U, forme directement liée à l'organisation d'un sol ferrugineux tropical induré. Ceci peut se produire également pour tout sol dont la structure et la texture favorisent la verticalité des berges.

A droite, ravin à réseau hiérarchisé entaillant un vaste glacier-versant. On remarque l'enchaînement des divers types d'écoulements et la juxtaposition de ruissellements concentrés et du ruissellement en nappe.

Figure 11 : Types de ravin en milieux de savane humide (à gauche) et savane sèche (à droite) (extrait de G. RIOU "L'eau et les sols dans les géosystèmes tropicaux" [172])

• le ruissellement en ravins : cette évolution est due à une surexploitation du milieu lorsque les entailles s'approfondissent considérablement. Les dimensions peuvent être considérables, 2 m à 10 m pour la profondeur, 10 à 20 m pour la largeur et 200 à 1000 m pour la longueur, comme ordre de grandeur.

Selon G. RIOU [172], sous une végétation "naturelle" les formes de ruissellement concentré sont limitées car les conditions fondamentales de l'incision linéaire - charge en matériel grossier et prolongement du flux de crue par des écoulements prolongés et importants - sont rarement réunies. Par contre, de nombreux facteurs favorisent les ruissellements en nappe.

1.2.1.3. LES RUISSELLEMENTS EN NAPPE

Les ruissellements en nappe se forment très près de l'amont et circulent vers l'aval en se concentrant et en prenant de l'épaisseur et de la vitesse dans les points bas de la topographie du versant (figure 12)

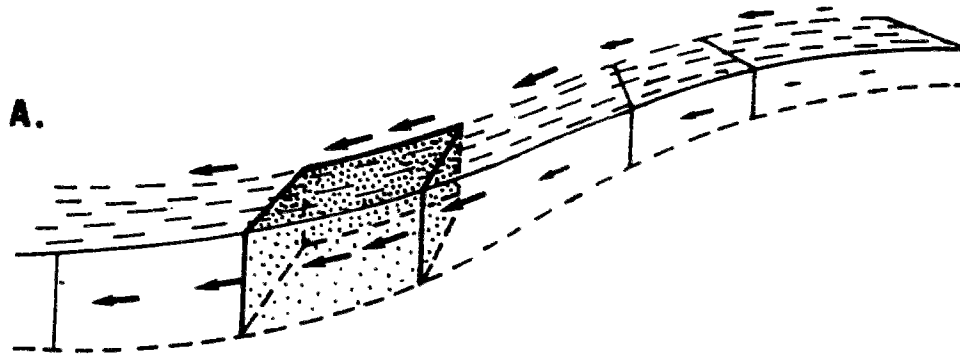


Figure 12 : Représentation schématique d'un ruissellement en nappe, sur sol nu (extrait de G. RIOU [172])

La végétation joue dans cette phase un très grand rôle en freinant ce balayage et en faisant alterner les zones d'écoulement libre et les zones de ralentissement-décantation.

Pour mieux décrire le processus, nous citons quelques types de ruissellement en nappe.

- le ruissellement en nappe discontinue : il est caractéristique d'un milieu forestier.

Il s'agit de nappes très minces (1 à 20 mm) qui se forment localement à la faveur d'une trouée dans le couronnement ou d'un effet de gouttière le long d'un tronc et qui progressent un peu avant d'être piégées dans un modelé ou de s'infiltrer.

Le versant est donc parcouru de multiples nappes fugaces. Ce ruissellement ne peut pas prendre en charge les particules, ni faire progresser les dépôts par roulage. Par contre, il est créateur d'un micro relief en marches d'escalier bien étudié par G. ROUGERIE, dans "Géographie de la biosphère", 1988 [173].

- le ruissellement en nappe non turbulente

La nappe non turbulente représente une lame d'eau d'épaisseur centimétrique ou décimétrique qui s'écoule lentement, freinée par les obstacles de rugosité du sol et par la végétation, parcourant une grande partie ou la totalité du versant. L'écoulement passe par plusieurs phases :

- une période d'imbibation, durant laquelle la battance⁽¹⁾ est extrême (figure 13). Un écoulement pelliculaire discontinu apparaît en plusieurs points du versant ;



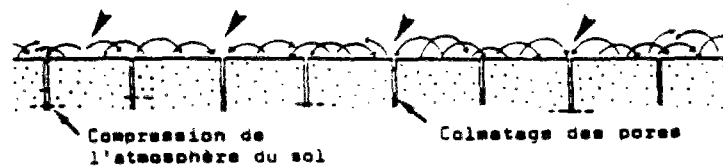
Figure 13 : Surface du sol après une phase de très forte battance (extrait de "L'eau et les sols dans les géosystèmes tropicaux" G. RIOU [172])

- puis une phase de développement de la nappe, qui devient de plus en plus épaisse vers l'aval (figure 12) ;

- puis un temps d'écoulement à régime permanent, les variations provenant directement de l'intensité de la pluie ou indirectement des modifications du régime d'infiltration ;

- enfin, une période de décrue, prolongée par le ressuyage des points hauts du modelé du sol. Durant cette phase, la nappe se fractionne, l'eau se concentre en chenaux ou en rigoles anastomosées, contournant les irrégularités du micro-relief.

⁽¹⁾ La battance est un phénomène physique d'altération de la surface du sol sous l'impact énergétique des gouttes d'eau (ou le "splash" d'Hudson)



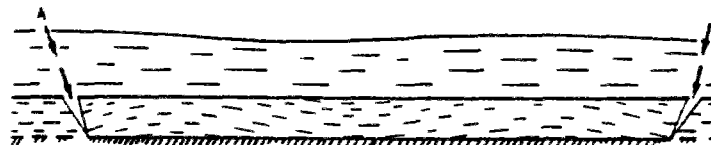
Phase I : Actions de battance



Phase II : Formation de la nappe, battance encore active. Imbibition partielle et effondrement des micro-structures de surface. Formation d'un plan de discontinuité.



Phase III : Saturation et effondrement des structures au dessus d'un plan de discontinuité de plus en plus marqué.



Phase IV : Décollements latéraux (en A). La nappe exerce une importante force de traction. La tranche de sol saturé franchit la limite de liquidité.



Phase V, et suivantes : Le départ d'une large plaque de sol crée un axe de concentration de la nappe qui devient plus épaisse, plus rapide, et éventuellement turbulente. D'où le développement d'une érosion en nappes ravinentes successives.

(1) L'épaisseur de la première plaque de sol franchissant la limite de liquidité est faible, 5 à 20 cm. et la surface affectée par le phénomène varie de quelques ares à un demi hectare ou plus. Lors des écoulements suivants l'ablation peut, soit s'étendre latéralement, balayant des surfaces considérables, soit se développer et s'accroître en fonction du micro-relief pré-existant selon un axe de concentration des eaux : les processus de l'écoulement en nappe font place aux mécanismes des ruissellements concentrés, l'érosion verticale succède à l'érosion latérale.

Figure 14 : Enchaînement des processus de l'érosion en nappe (extrait de G. RIOU "L'eau et les sols dans les géosystèmes tropicaux" [172])

- (1) Franchissement de la limite de liquidité (Wl) : La limite de liquidité est la teneur en eau (exprimée en %) d'un sol correspondant à la teneur en eau libre (à écoulement lent) qui provoque l'effondrement des structures et la disparition de toute cohésion ; le sol s'écroule sous l'effet de gravité

Cet écoulement correspond à la pluie qui tombe sur la surface considérée, sans apport extérieur. Toute arrivée d'eau à l'amont se traduit par des perturbations dans le régime de la nappe, ou la transformation partielle en écoulement concentré par juxtaposition de secteurs à écoulement de nappe et du secteur à incisions ravinantes.

L'aval de la nappe de ruissellement peut être renforcé par le débordement de thalwegs latéraux ; il en résulte une grande épaisseur de lame d'eau et une confusion momentanée des directions d'écoulement ;

- ~~le ruissellement en nappes turbulentes~~ (figure 14) : c'est le ruissellement le plus dangereux.

Il s'agit de l'écoulement d'une lame d'eau, parfois très épaisse (> 50 cm), rapide, à tourbillons, avec un front de turbulence à compétence élevée. Ce ruissellement ne se crée pas sur le versant, mais résulte de pluies qui se sont abattues sur un relief de commandement ; progressivement, vers l'aval, la nappe perd de l'énergie et dépose sa charge selon une granulométrie décroissante. C'est le ruissellement à nappes turbulentes qui, parfois combiné avec d'autres types de ruissellements, provoque les plus graves dégâts et qui est à classer dans les Risques Majeurs.

1.2.2. LES FACTEURS GEOLOGIQUES DANS L'ETUDE DU RUISSELLEMENT

1.2.2.1. AU NIVEAU DE LA PARCELLE :

Le ruissellement laisse des traces de ses parcours préférentiels au niveau de la parcelle. Les traces sont en général de forme DENDRITIQUE⁽¹⁾, en forme de ramification arborescente (figure 10-b). Le drainage naturel de surface, créé par le ruissellement, peut aussi avoir d'autres formes, comme un tracé en "treillage" (figure 10-a).

1.2.2.2. AU NIVEAU DU BASSIN VERSANT :

Les bassins versants ont aussi des parcours de ruissellement définis par des écoulements intermittents, d'eaux non pérennes, qui peuvent être schématisés comme indiqué sur la figure 15 (a-b-c).

Ces écoulements ont à l'aval un débit très différent, comme le montrent les hydrogrammes schématisés.

Selon les études de N. STRAHLER [189, paragraphe 4.II], professeur de Géomorphologie à l'Université de Columbia (U.S.A.), les définitions des caractéristiques des drainages naturels des surfaces permettent de faire une approche des QUANTITES D'EAUX RUISSELLEES.

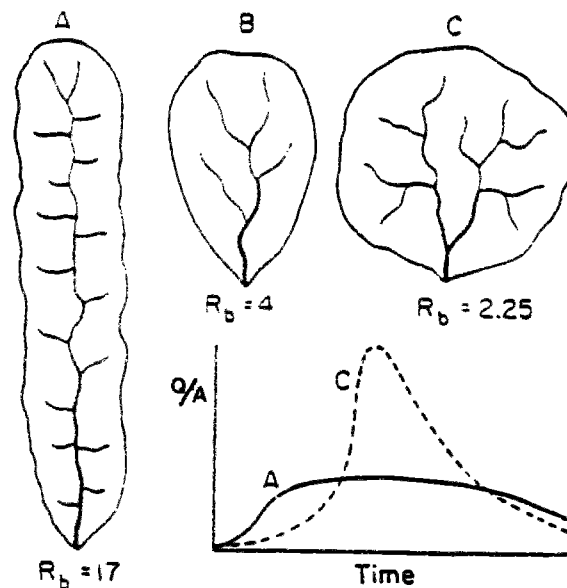


Figure 15 : Confluents

Le pourcentage des "bifurcations" (R_b) amène d'importantes variations dans les débits de pointe. Le chevelu hydrologique donne, dans le cas du bassin versant A, une réponse sans risque, tandis que celui du bassin versant C amène une réponse à risque (extrait de N. STRAHLER [189 paragraphe 4.II] "Handbook of applied hydrology").

(1) Se dit d'un réseau fluvial densément et régulièrement ramifié

Dans ce cas, on découpe les espaces suivant les lignes de partage des eaux et on somme les sous-bassins premiers (les plus hauts placés), seconds, troisièmes, etc. en ajoutant comme surfaces additionnelles celles des inter-bassins. (figures 16 et 17).

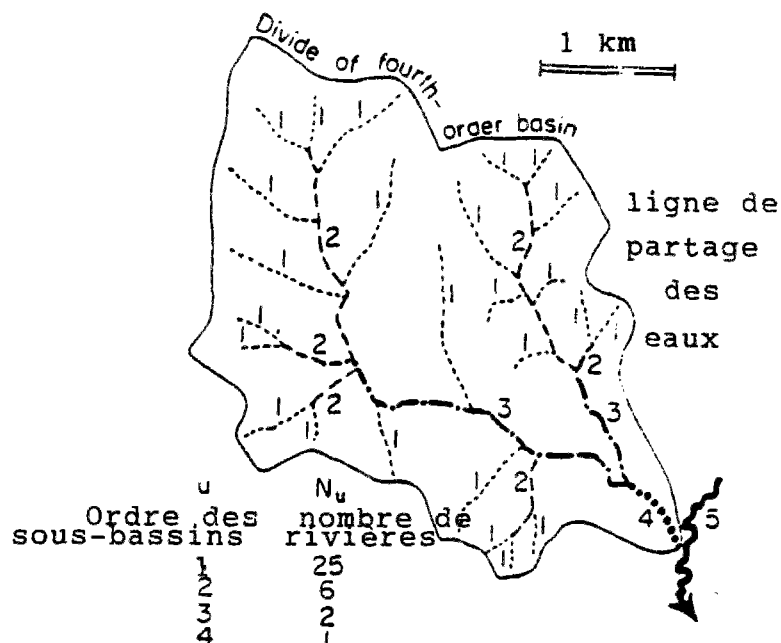


Figure 16 : Répertoire des écoulements d'un bassin-versant hydrologique : ordre et nombre des cours d'eau (extrait de N. STRAHLER [189 paragraphe 4.II] "Handbook of applied hydrology").

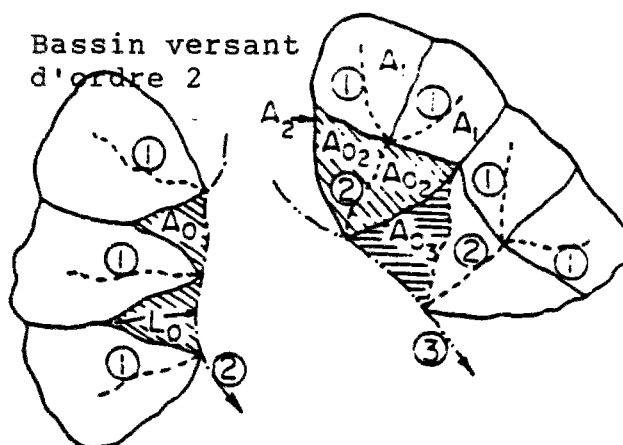
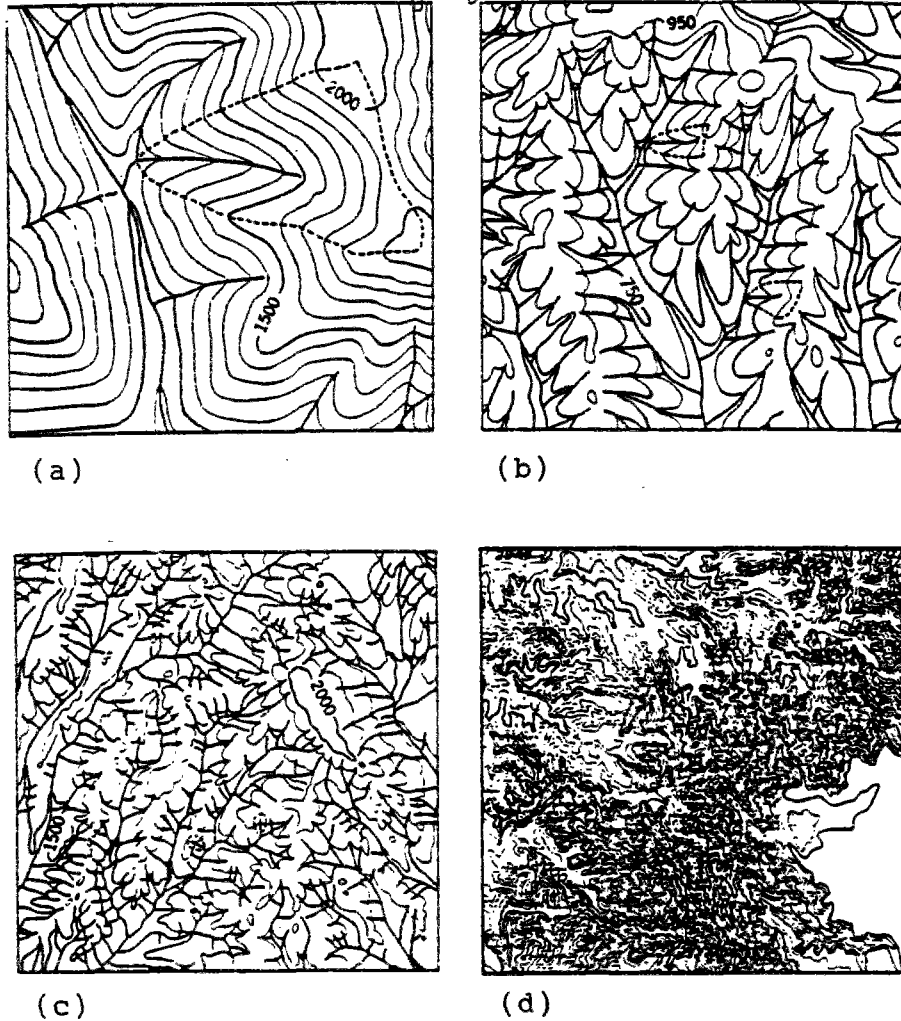


Figure 17 : Impact des surfaces inter-bassins sur le ruissellement (extrait de N. STRAHLER [189 paragraphe 4.II] "Handbook of applied hydrology")

• Le réseau hydrographique

Les densités du drainage naturel à l'échelle d'un bassin versant varient énormément. On peut aller d'une faible densité à une très forte densité, comme le représentent les schémas de la figure 18. L'expression d'un drainage naturel est donc infinie.

AREAL ASPECTS OF DRAINAGE BASINS



(From maps of the U.S. Geological Survey. Reproduced by permission from Strahler, *Physical Geography*, copyright by John Wiley & Sons, Inc., New York, 1960.)

Figure 18 : La diversification du réseau hydrographique de différents bassins versants - densité des talwegs

- a- Faible densité du drainage naturel
- b- espacement moyen
- c- forte densité du drainage naturel
- d- très forte densité

(extrait de N. STRAHLER [189] "Handbook of applied hydrology")

- La répartition des lits d'écoulements- quantité et longueur des segments (stream frequency) (figure 19)

Les chiffres représentent le nombre de bifurcations

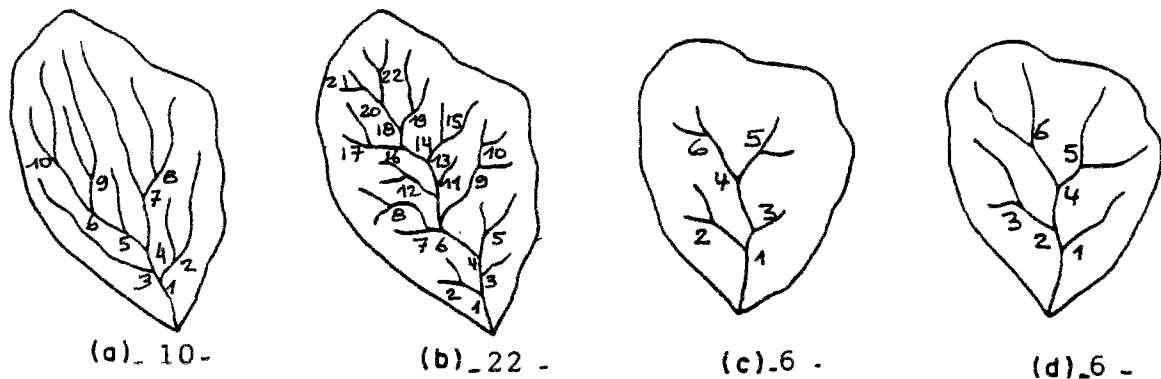


Figure 19 : Répartition spatiale du drainage naturel
(extrait de N. STRAHLER [189] "Handbook of applied Hydrology")

En retournant à l'échelle d'un micro-bassin versant, la densité du drainage naturel et l'organisation des lits d'écoulements peuvent avoir différents impacts sur les crues de ruissellement.

Les bassins (a) et (b) ont la même densité spatiale de drainage naturel mais une organisation du réseau hydrographique différente. L'écêtement des crues de ruissellement est meilleur dans le deuxième cas, par la répartition des bifurcations.

Les bassins (c) et (d) ont la même organisation des lits d'écoulement, avec une densité de drainage naturel tout à fait différente.

De fait, naturellement, il existe une tendance à ce que le rapport entre la densité du drainage naturel et la répartition des écoulements s'équilibrent.

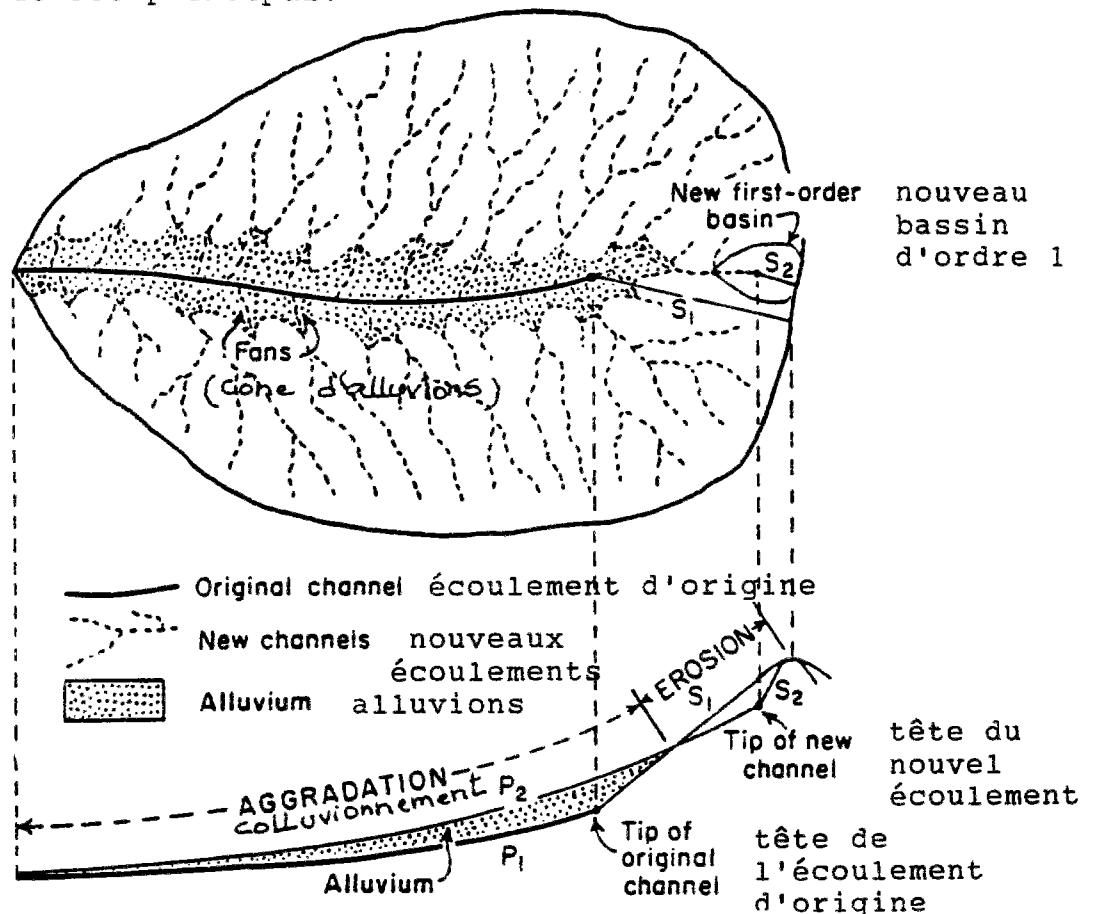
1.2.2.3. EFFET DU COUVERT VÉGÉTAL SUR LE RUISSELLEMENT

L'effet du couvert végétal sur le ruissellement est capital, toujours selon **N. STRAHLER** [189].

Si une zone forestière est dénudée, puis intensément cultivée, le ruissellement va s'intensifier et les surfaces susceptibles d'être érodées aussi.

La transformation du réseau hydrologique va être totale, sous l'action du ruissellement.

Comme le montre la figure 20, l'écoulement initial de l'époque forestière va se transformer totalement, suite au déboisement. On assistera à un fort développement de RAVINES, qui vont augmenter la densité du drainage naturel, lequel va approfondir les parcours des écoulements et les surfaces en déclivité, éroder les terres arables, entraîner les particules à l'aval et envaser le lit principal.



Ravinement généralisé de quelques mètres à quelques dizaines de mètres de commandement (développement des terres stériles)

Figure 20 : Evolution d'un réseau hydrologique en fonction d'un déboisement et de l'action du ruissellement (extrait de N. STRAHLER [189 paragraphe 4.II] "Handbook of applied hydrology")

1.2.3. LES PLUIES

L'eau présente dans l'atmosphère résulte de l'évaporation produite à la surface des mers (et dans une moindre mesure à celle des continents) par la chaleur du soleil (énergie solaire). L'eau retombe ensuite sous forme de précipitations : pluie, brouillard, neige ou grêle. Les trois-quarts de cette eau retournent à la mer par ruissellement et voie gravitaire (énergie de gravité) (cf. A. ASHEW, OMM Genève [52]).

Les caractéristiques d'une pluie dépendent de l'ENERGIE CINETIQUE des gouttes d'eau, du diamètre et de la vitesse des gouttes et de l'INTENSITE de la pluie.

Par intensité, on désigne la quantité d'eau en mm qui tombe durant une heure (mm/h).

Selon **RONAN C.A.**, dans son livre "Le Guide du Ciel" [235], il faut distinguer l'intensité "instantanée", par exemple une pluie tombe à raison de 120 mm par heure, et la durée pendant laquelle se maintient cette intensité, par exemple l'intensité précédente s'est maintenue pendant 45 minutes.

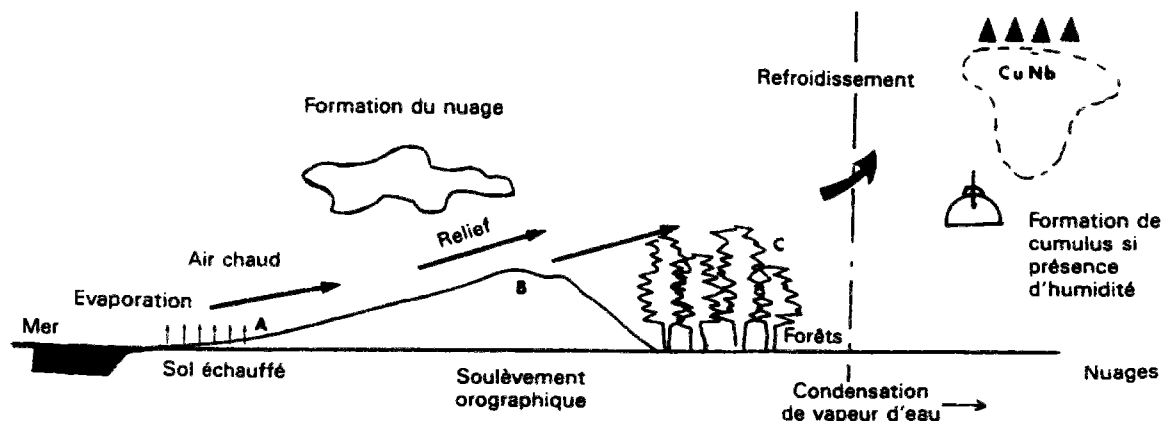
Le diamètre des gouttes peut varier d'une fraction de mm jusqu'à 9 mm pour des averses exceptionnelles. La vitesse est de l'ordre de 9 m/seconde, pour des gouttes de 6 mm après 7 à 20 m de chute.

1.2.3.1. LES DIVERSES PLUIES :

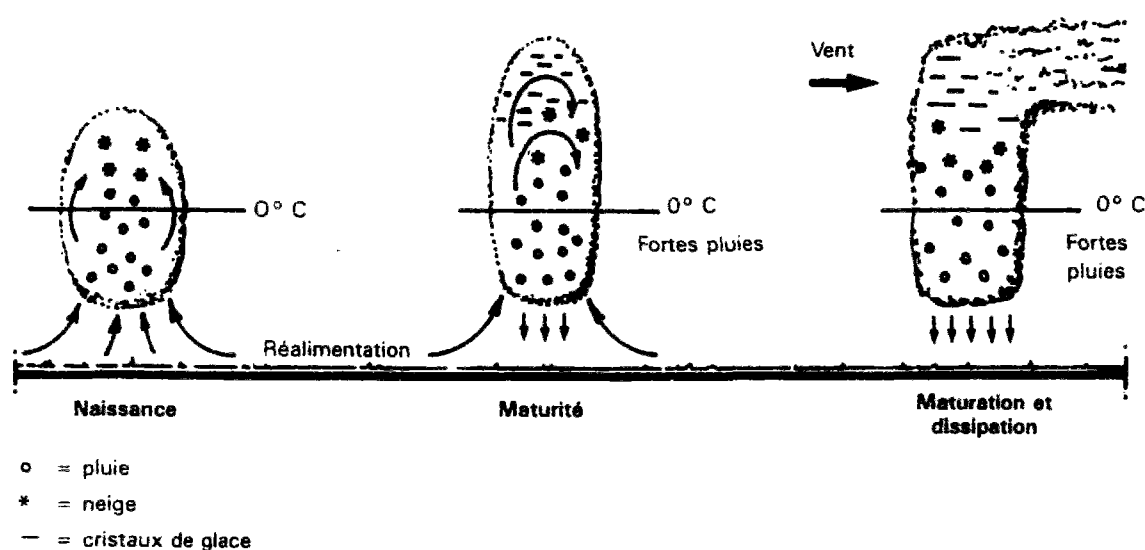
Nous citerons quelques pluies à risque :

- les pluies de LIGNES DE GRAINS : ce sont des pluies caractérisées par de très fortes intensités au début d'averse (> 120 mm/h en 5 minutes) et d'une durée assez courte (1 à 4 heures) ;
- les pluies de ZONE DE CONVERGENCE (Z.I.C.) : elles sont dues à des systèmes nuageux puissants et complexes à cumulo-nimbus. Leurs intensités maximales ne sont pas les plus fortes mais les volumes de pluies unitaires atteignent des valeurs élevées: 200 à 270 mm en 12-15 heures ;
- les pluies de CONVECTION, à cumulo-nimbus simples, dues à des ascensions thermiques localisées, de durées assez brèves, 1-3 heures, souvent en fin de journée. Ce sont des pluies à très grosses gouttes tombant régulièrement, avec des intensités moyennes et sans vents.

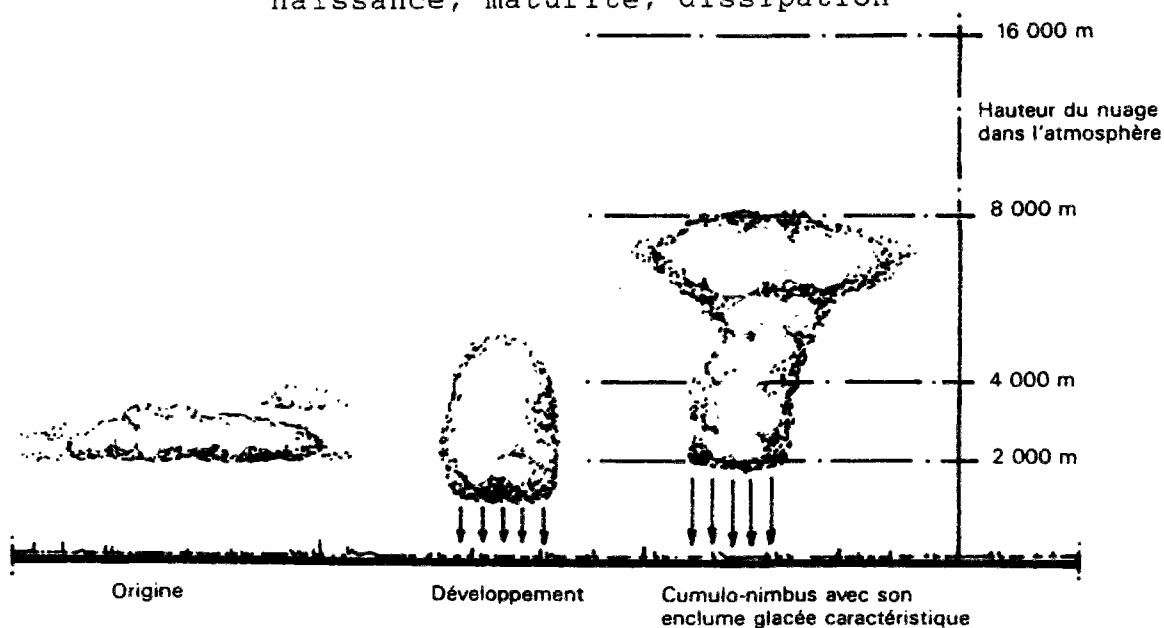
Ces diverses pluies se répartissent dans l'année selon des REGIMES PLUVIOMETRIQUES. Pour la France, ces régimes pluviométriques de l'arc méditerranéen - qui passe par le Languedoc-Roussillon, les Cévennes jusqu'au Queyras - sont les plus dangereux par les quantités d'eau qui tombent pendant un laps de temps très court (cf. l'Instruction Technique relative aux réseaux d'assainissement des agglomérations de 1977) (figure 16).



a - Formation du cumulo-nimbus
(extrait M.Guillon "Le cycle de l'eau", Ed. WEKA [14])



b - Les trois stades du cumulo-nimbus [14]
naissance, maturité, dissipation



c - Les nuages à développement vertical
(extrait M.Guillon "Le cycle de l'eau", Ed. WEKA [14])

Figure 21- Le cumulo-nimbus.

1.2.3.2. LES CUMULO-NIMBUS (Cu Nb)

Les nuages à gros risques sont les cumulo-nimbus (Cu Nb) (figure 21-a). Les cumulo-nimbus sont le siège de violentes turbulences, surtout en été. Mais ils déclenchent des orages avec foudre à toute époque de l'année.

Le cumulus comporte trois stades : la naissance, la maturité, la dissipation (figure 21-b).

Les cumulus peuvent être persistants lorsqu'ils sont associés à un puissant front froid. C'est le cas de la catastrophe de Nîmes où l'eau s'est renouvelée sur place.

- Des nuages à développement vertical

Le cumulo-nimbus, avec son enclume glacée caractéristique, régénère son contenu en eau grâce à un emprunt de vapeur d'eau qui ne peut venir que du bas par des mouvements ascendants (documents : WEKA, l'origine de l'eau, les pluies, l'auteur : M. GUITON partie 2 chap. 1.3.2.).

Tous les facteurs contribuant à l'ascendance de l'air et à son refroidissement par détente sont responsables de la saturation et des précipitations fortes (figure 21-c).

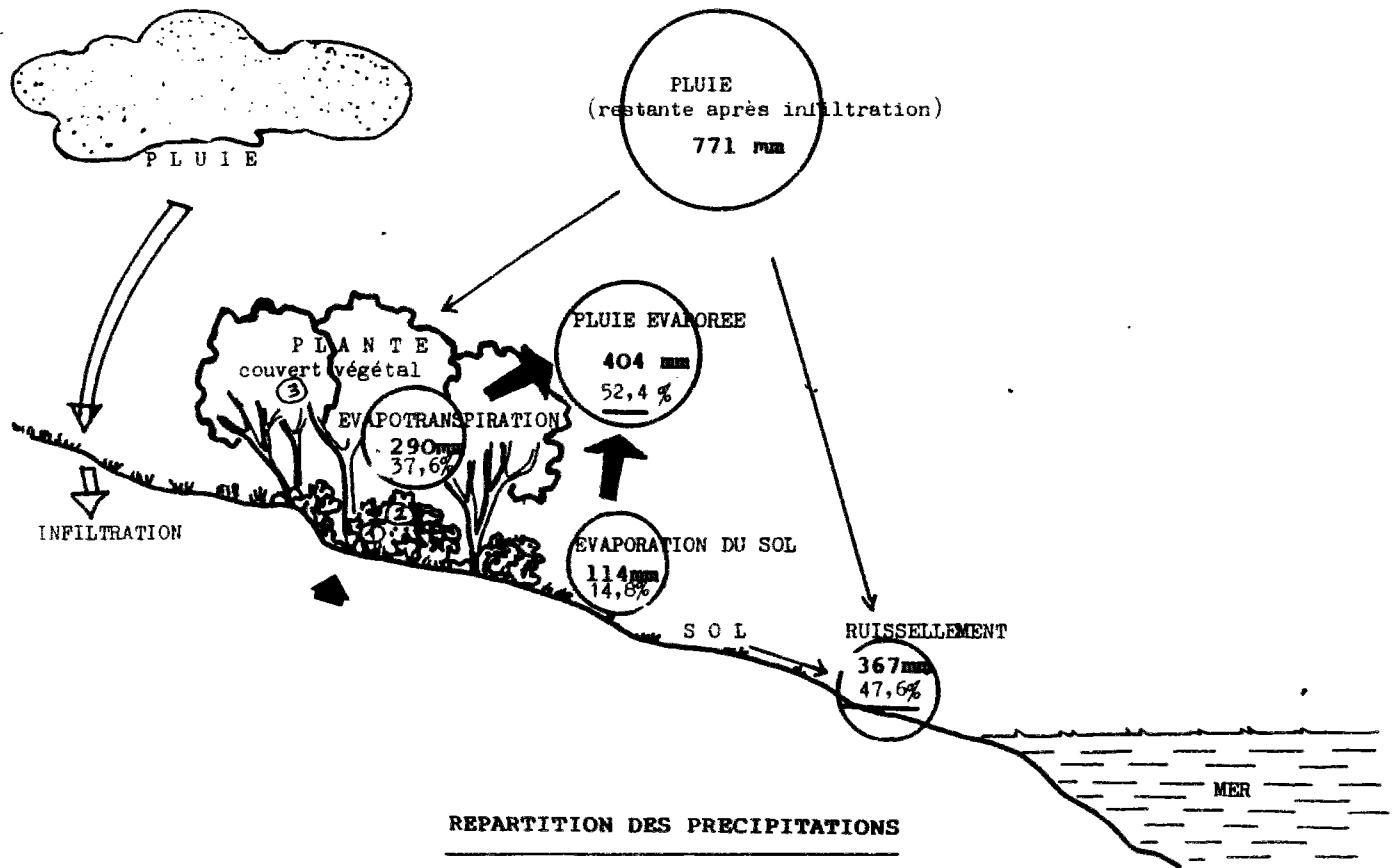
- Formation de la goutte de pluie dans un cumulo-nimbus

La vapeur d'eau se transforme en cristaux de glace. Les cristaux de glace atteignent une taille qui leur permet de tomber par leur poids, et de se transformer soit à l'état de pluie si l'air est à une température élevée, soit à l'état de neige si l'air des basses couches est froid. Dans les nuages chauds (été, début de l'automne) les grosses gouttes englobent les plus petites dans leur chute. Ce sont donc de grosses gouttes de pluie qui arrivent au sol avec la violence de l'orage, affectant le ruissellement et l'érosion des sols.

- Danger de la pluie artificielle : modification du climat

On a réussi à provoquer à titre expérimental la pluie en répandant sur des nuages surfondus des cristaux d'iodure d'argent dont la structure est très proche de celle de la glace : on assiste, alors à la formation de cristaux de glace qui fondent ensuite, et tombent en pluie, avec les mêmes inconvénients qu'une pluie de cumulo-nimbus (cf. Mme M. GUITON, Editions WEKA "VRD - Espaces verts", "le cycle de l'eau" chap. 2, 112 pages [14]).

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT
Audio-visuel sur l'environnement . 1984 .



BILAN GLOBAL (d'après R.DAJOZ , "Précis d'Ecologie " Le Cycle de l'eau en climat tempéré)

Tableau 22 - Répartition des précipitations entre le ruissellement ,l'évapotranspiration et l'infiltration.
[77]

- (1) STOMATES : ensemble de deux cellules réniformes ménageant entre elles une petite ouverture par laquelle l'atmosphère interne d'une plante communique avec l'extérieur.
La feuille évapore surtout par sa face inférieure.
- (2) EVAPOTRANSPIRATION : terme général pour indiquer la quantité d'eau évaporée par le sol, les nappes d'eau, et transpirée par les feuilles.
En botanique, le terme correspond plus exactement à l'évaporation des feuilles et à la transpiration des stomates.

1.2.4. LE RÔLE RALENTISSEUR DU COUVERT VÉGÉTAL

Le rôle de la VEGETATION dans l'interception des précipitations, bien que souvent trop peu mis en pratique, nous a paru d'un intérêt considérable par son efficacité et par les potentialités d'amélioration générale de la qualité de l'environnement.

En effet, dans les travaux d'architecture, la végétalisation est essentiellement prévue pour répondre à une demande "esthétique". Elle n'est qu'exceptionnellement vue sous l'angle de la lutte contre les eaux de surface.

Les recherches que nous citons s'appuient sur des bilans hydrologiques annuels. Nous les avons retenus pour donner un ordre de grandeur des potentialités de rétention de la végétation, après la crise.

1.2.4.1. LA VÉGÉTATION, PARAMÈTRE D'INFLUENCE MÉCONNUE

La végétation joue un rôle au niveau de l'écoulement des eaux de ruissellement [89]. Mais ce rôle varie suivant la température, le cycle saisonnier de la végétation, l'état de la végétation (densité et hauteur) et l'état de saturation des sols avant averses (livre de Y. DRUET [86]).

a- La répartition des précipitations entre le ruissellement, le sol et la végétation

LE STADE DES RECHERCHES :

- d'après M. DAJOZ, dans son livre "Précis d'Ecologie" de 1983 [77] et les mesures expérimentales faites en République Fédérale d'Allemagne (reprises par l'audiovisuel "Environnement" du Ministère de l'Environnement), les précipitations se répartissent comme suit (tableau 22) :

Pour une pluie restante après infiltration de 771 mm, la pluie évaporée est de 404 mm et la pluie ruisselée de 367 mm.

Parmi les quantités de pluie évaporées, 1/3 est évaporé par le sol, et 2/3 sont évaporés par la végétation, soit directement par l'assèchement du feuillage, soit par la transpiration des feuilles au niveau des stomates⁽¹⁾.

L'ensemble de ce double processus d'évaporation et de transpiration végétale s'appelle l'évapotranspiration maximale⁽²⁾ (E.T.M.), qui est la quantité d'eau perdue par une culture dans des conditions d'alimentation hydrique non limitatives.

- d'après M. MEHER - Homji (1984) de l'Institut Français de Pondicherry, Inde, (tableau 23 [144]), les mesures de répartition de pluie en forêt ont donné les résultats suivants:

Pour une pluie tombée en totalité sur une forêt, 25 % sont retenus par le feuillage et évaporés, 50 % sont rejetés en vapeur d'eau par le phénomène de transpiration des feuilles et 25 % se transforment en ruissellement. Le rôle de la forêt sur le cycle des précipitations est donc de résorber les 3/4 des pluies tombées.

(1) et (2) Définitions p. 46

BILAN HYDROLOGIQUE EN FORET

d'après V.M. Meher-Homji 1984
 " Désertification ou déluge " Pondicherry . Institut Français .

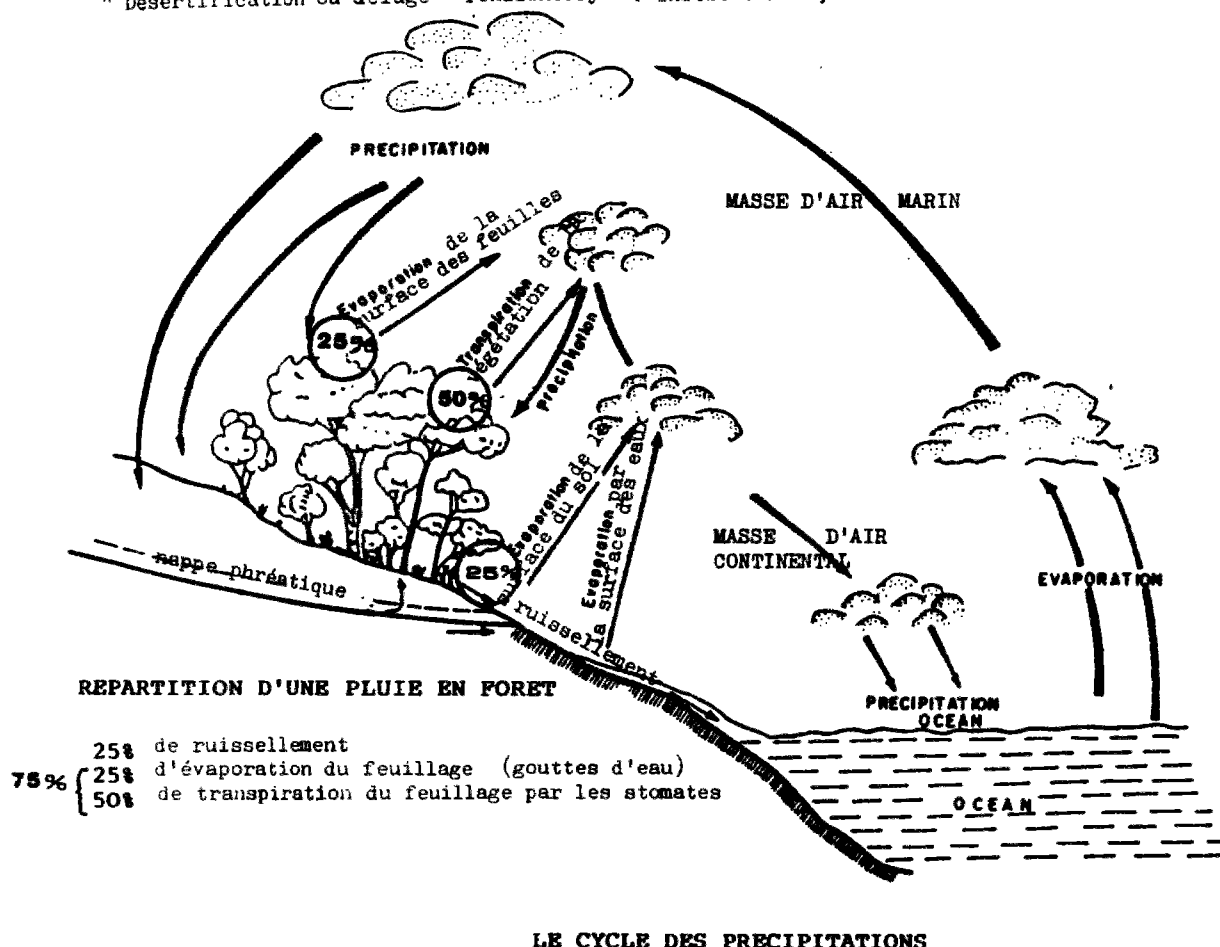


Tableau 23 : Recherche sur la répartition d'une pluie de mousson en forêt
 (d'après Meher-Homji [144])

- d'après M. LEMEE et les expériences de M. Schnock (1978), faites en Belgique (tableau 24 [135]), le cycle de l'eau diffère suivant les saisons - été/hiver - et suivant les végétaux s'ils sont persistants ou caduques, avec ou sans feuillage.

En ETE, pour une pluie de 490 mm interceptée par un feuillage, 109 mm sont immédiatement ré-évaporés.

Les eaux d'ECOULEMENT, soit 19 mm, suivent les branches et le tronc pour s'infiltrer dans le sol.

Les eaux d'EGOUTTEMENT, soit 362 mm, tombent dans la litière des feuilles mortes, dont l'épaisseur peut atteindre 30 mm, puis s'infiltrer dans le sol.

Sur ces 381 mm infiltrés, 90 mm vont alimenter les nappes souterraines, 114 mm vont être évaporés par le sol (nous retrouvons le chiffre de M. DAJOZ), 177 mm vont être rejetés par la transpiration des stomates.

Les chiffres de cette expériences permettent de mieux cerner l'impact de la végétation sur le ruissellement.

Le premier constat est que les feuilles évaporent directement autant d'eau que le sol herbacé.

Le deuxième constat est que le phénomène de TRANSPIRATION des cellules des feuilles est sensiblement le double de l'évaporation du sol ou des feuilles.

En HIVER, les chiffres de l'évapotranspiration, regroupant les deux évaporations (sol, feuilles), et la transpiration (feuilles), sont bien plus faibles. L'évapotranspiration ne représente que le cinquième des pluies tombées (1/5) alors qu'en été, elle représente les 4/5 pour un arbre à feuillage caduque.

La différence entre ces chiffres (400 mm en été et 107 mm en hiver) de pluies évaporées serait totalement différente si le feuillage était persistant, au lieu d'être caduque.

- un autre élément est à prendre en compte. C'est la proportion qui existe entre la transpiration d'un ligneux de la strate arborescente ou de la strate arbustive et son poids.

D'après P. OZENDA [157], la quantité d'eau qui traverse une plante (l'eau absorbée par l'appareil souterrain est rejetée par les parties aériennes) est égale à plusieurs fois son poids. De ce fait, les besoins en eau des forêts sont supérieurs aux besoins d'eau des groupements herbacés.

Après avoir examiné la question théorique des rapports entre les précipitations et la végétation, et donc du rôle réel de la végétation dans les phénomènes de ruissellement et d'érosion, nous allons aborder une autre fonction de la végétation, celle de RALENTISSEUR de vitesse du ruissellement, et donc d'étalement des crues et d'écêtement des valeurs de pointe.

1.2.4.2. LE RÔLE DE LA VÉGÉTATION COMME RALENTISSEUR DES PRÉCIPITATIONS

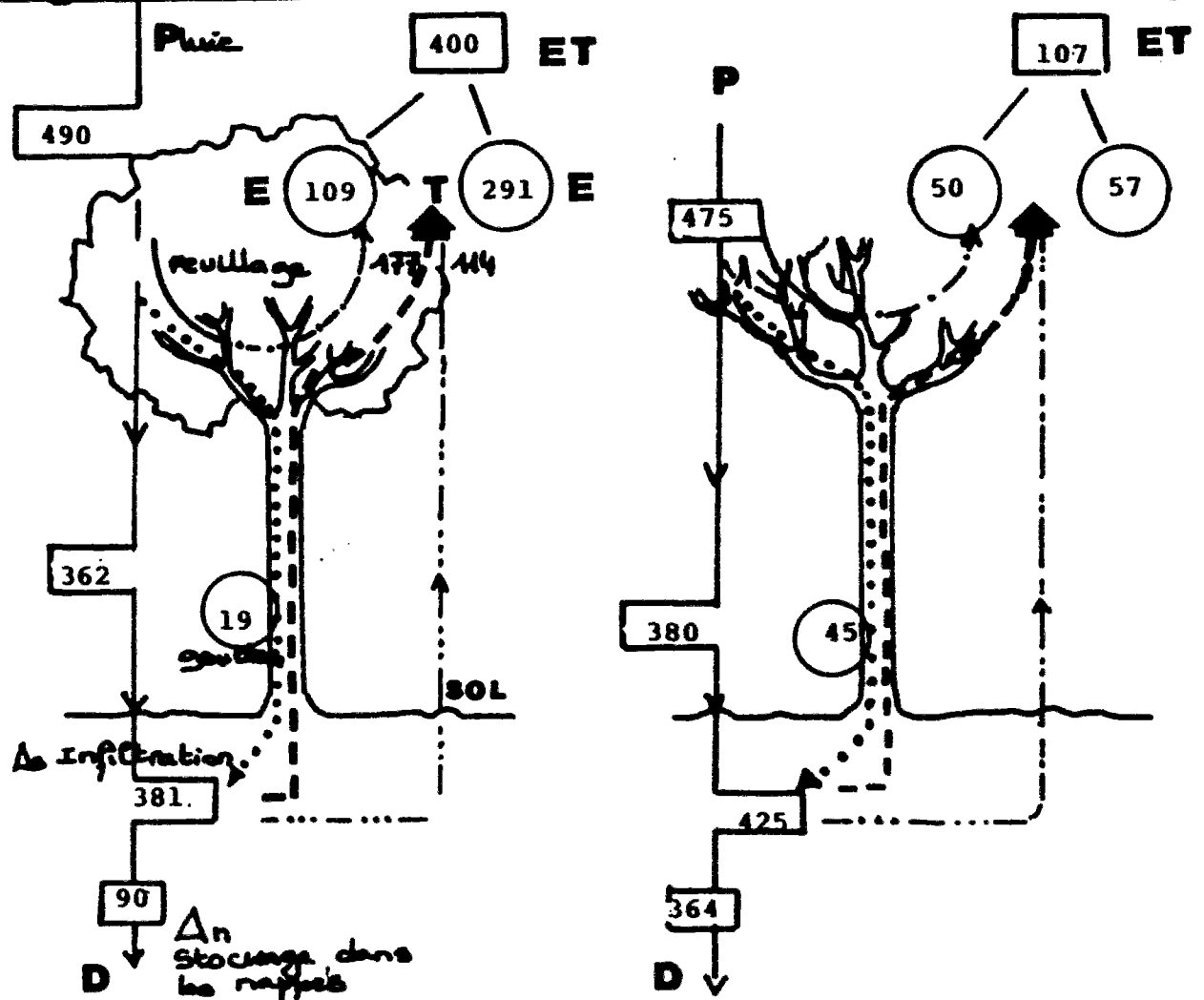
La végétation joue un rôle de ralentisseur dans la constitution et la propagation de la crue (figure 25).

La pluie tombant sur un massif boisé est éclatée en gouttes, qui s'écoulent des feuilles aux branches, des branches aux troncs pour les "eaux d'égouttement". La composition de la litière elle-même, faite de feuilles mortes enchevêtrées, ralentit la progression du ruissellement au sol (DEA Mme M. GUITON [106]).

a- Les bassins versants

Les eaux de pluies tombant sur un bassin-versant sont interceptées par le COUVERT végétal, qui se décompose en trois STRATES - Strates herbacée, arbustive et arborescente.

CYCLE DE L'EAU



BILAN HYDRIQUE SAISONNIER - AVEC FEUILLAGE ET SANS FEUILLAGE - dans une chênaie - Belgique -(d'après G.Schnock) Les valeurs sont en mm. de précipitations.
 "Précis d'écologie végétale" de G.LEMEE . 1978 .

ET = évapotranspiration
 E = évaporation
 T = transpiration
 D = infiltration

Tableau 24 : Le cycle de l'évapotranspiration suivant les saisons - Expérience de laboratoire [135]

Ce rôle de rétention est influencé d'après **MM. LAMBERT** et **HOUZARD** [86] par :

- la densité du couvert végétal (nombre d'individus au m²),
- le type de végétaux (caduques, persistants),
- la période du cycle végétatif (période de repos, de montée de sève, l'aoûtement⁽¹⁾, la descente de sève ...).

Les chercheurs ont essayé d'approcher ces phénomènes d'interception par l'élaboration de coefficients pour les différents types de couverts, tenant compte de la densité, la période végétative, et l'intensité de l'épisode pluvieux.

Suivant l'avis de **M.A. PONCET**, Ingénieur ENGREF [163], l'abandon de l'agriculture sur de fortes pentes et la décharge pastorale FAVORISENT le développement de la couverture SPONTANEE, qui évolue progressivement. La porosité et la RETENTION HYDRIQUE des hauts bassins versants s'améliorent de ce fait.

Les pentes des montagnes colonisées par les graminées, accentuent parfois le ruissellement, à cause des pentes. Il suffit soit de reboiser, soit de créer des BANQUETTES pour allonger le temps d'infiltration (figure 26).

b- L'impact des forêts

Le REBOISEMENT est une oeuvre "d'infrastructure" particulièrement efficace dans la maîtrise des eaux de pluie au niveau de leur récolte, de leur infiltration et du premier ruissellement ralenti.

Le DEFRICHEMENT est une source de dégradation du relief, et de désordres hydrogéologiques critiques, accentués par une pratique sylvicole mécanisée trop brutale, par des engins forestiers trop importants conçus pour des forêts en plaine.

La DEFENSE PASSIVE en zone de montagne, constituée de gros ouvrages de rétention des eaux de ruissellement, devient de plus en plus onéreuse.

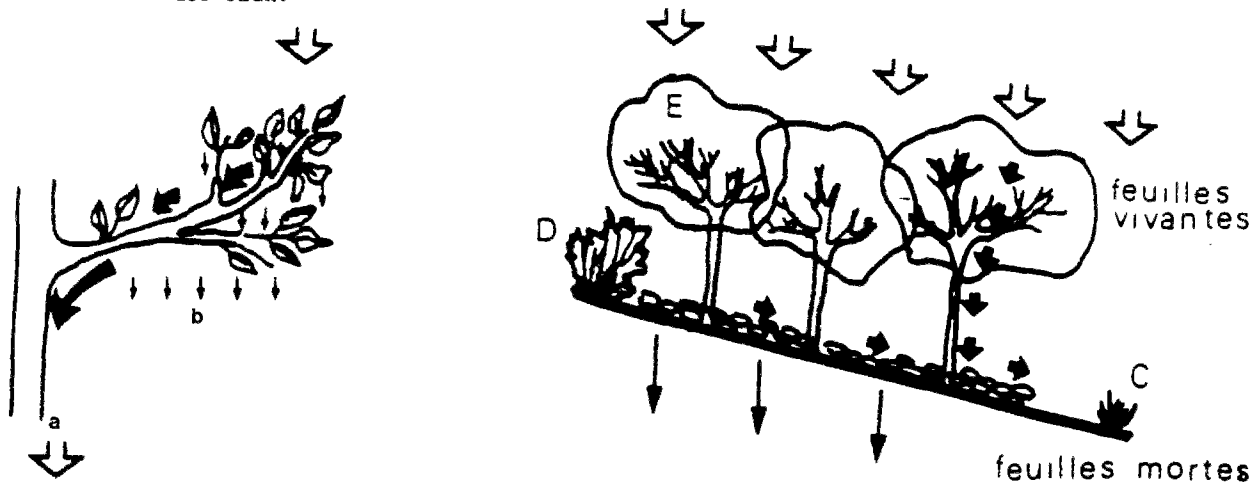
Un reboisement forestier est aussi efficace au niveau de la rétention du ruissellement qu'un ouvrage hydraulique. Reboiser 1 000 ha (soit 10 km²) coûte moins cher que construire des ouvrages maçonnés pour le même pouvoir de rétention d'après l'avis de forestiers (M.A. PONCET, dans "les eaux de ruissellement et la forêt" [163]), et d'après les directives helvétiques sur "la protection contre les crues des cours d'eau" [221].

Au niveau économique, le bilan est à étudier de près ; à un gain apporté par la production d'énergie d'un barrage par exemple peut s'opposer les pertes dues à la détérioration des sols érodés devenant stériles, et aux envasements des ouvrages construits, par les terres arrachées par le ruissellement.

(1) AOÛTEMENT : Développement particulier des végétaux à la suite d'une température favorable, situé au mois d'août généralement, et ayant les mêmes effets que la montée de sève du printemps

EFFETS DE RETENTION PAR LA VEGETATION

La végétation joue un rôle de RALENTISSEUR sur les précipitations et le ruissellement, dans la constitution et la propagation des eaux.



DETAIL

RETENTION ET EVAPORATION

L'eau de pluie passe de la feuille à la branche puis au tronc.

En humidifiant le végétal, la pluie a une partie qui s'évapore.

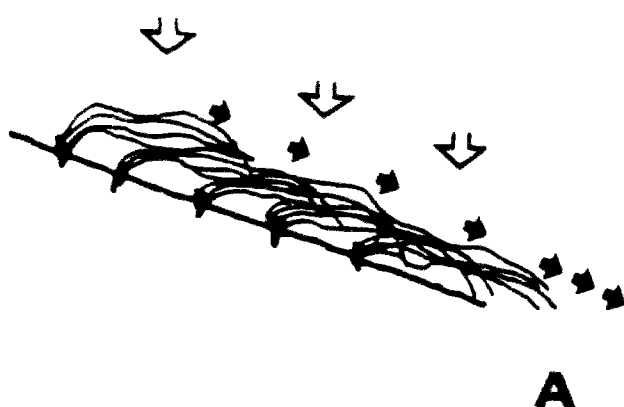
a- eaux d'écoulement
b- eaux d'égouttement

EFFETS DE RETENTION SUR LES PRECIPITATIONS ET LE RUISSELLEMENT

- Interception par les cimes
- Effet de ralentisseur : les 3 strates (C,D,E), les feuilles, branches, troncs et litière.
- Infiltration dans l'humus.

Figure 25- Le rôle ralentisseur de la végétation (extrait du DEA de M.Guiton [106])

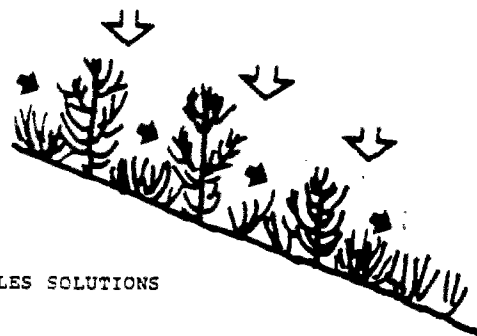
LES GRAMINEES DES ALPAGES



A

LE PROBLEME

Les gouttes d'eau glissent sur les graminées couchées et prennent de la vitesse.



B

LES SOLUTIONS

- ENSEMENCER et développer les friches spontanées (genêts...)
- REBOISER
- Créer des BANQUETTES pour interrompre le ruissellement et allonger le temps d'infiltration.

Figure 26- Ruissellement en montagne et déprise agricole (extrait DEA M.Guiton (106) "Ruissellement, sol et végétation dans les travaux d'infrastructure")

1.2.4.3. ABSORPTION DU RUISSELLEMENT PAR LA VÉGÉTATION

La végétation est une grosse consommatrice d'eau.

La plante absorbe l'eau, on l'a vu, par ses racines, et la rejette par ses parties aériennes sous forme de vapeur d'eau qui peut retomber à son tour en rosée et brouillard.

a- Besoin total en eau d'une plante [157]

Le besoin en eau peut être exprimé en quantité transpirée par le végétal au cours de l'année. Pour le calcul de ce besoin total en eau, on se rapporte à la surface qu'une plante occupe, ou encore à l'unité de surface d'un groupement végétal (densité) en divisant la quantité d'eau transpirée par la surface considérée.

D'après P. OZENDA [157], pour l'Europe tempérée, les expérimentations ont donné comme hauteur d'eau équivalente à la transpiration totale d'une plante pendant 1 an, les résultats suivants :

Prairie sèche à Brome	200 mm
Forêt de pin Sylvestre	160 mm à 310 mm
Forêt d'Épicéa	250 mm à 520 mm
Forêt de Mélèze	290 mm à 680 mm
Forêt de Hêtre	230 mm à 460 mm
Forêt de Bouleau	350 mm à 560 mm

Une prairie a donc une hauteur d'eau équivalente à la transpiration pendant un an égale à 200 mm d'après P. OZENDA.

Les besoins en eau sont plus élevés pour une forêt de hêtres ou de bouleaux (feuillage caduque) que pour une forêt de pins. Par contre, les forêts d'épicéas (feuillage persistant) sont concurrentielles aux forêts à feuillage caduque (bouleau). Et les forêts de mélèzes (conifère caduque) sont donc très consommatrices d'eau.

b- Teneur en eau d'une plante

La teneur en eau d'une plante, si l'on considère une plante entière, est toutefois du même ordre pour toutes les espèces (70 % à 80 % du poids frais) et relativement constante. Le Point de Fanaison (PF) d'un sol, c'est-à-dire la teneur en eau de ce sol au moment où les plantes qu'il porte se fanent, est indépendant de l'espèce considérée.

c- Le contrôle de la transpiration relève de la structure des feuilles, notamment du nombre, de la disposition et du fonctionnement des STOMATES [157].

Il existe des groupements végétaux évaporant PLUS que la pluviosité annuelle :

- pour les prairies humides à CATHA et CIRSIUM, la valeur de la transpiration dépasse 1 mètre (1 000 mm) en région tempérée, où les pluies sont de 700 mm,
- l'Acacia d'Afrique transpire 1 200 mm et plus pour une pluviométrie de 500 mm.

d- Drainage par la végétation [157]

L'utilisation d'arbres à forte transpiration peut contribuer au drainage de sols trop humides. Par exemple, l'AULNE (AULNUS GLUTINOSA) agit à la manière d'une pompe et supporte bien l'eau stagnante.

Il en est de même pour tous les végétaux des ripisylves.

1.2.4.4. LES SURFACES D'IMMERSION VÉGÉTALISÉES

Si tous les végétaux sont capables de participer à la rétention des eaux de surface, ils sont par contre de sensibilité variable face à l'immersion.

La sensibilité à l'ENNOIEMENT est variable d'une espèce à l'autre, avec des variations complémentaires dues au stade végétatif, à l'âge de la culture et à la variété de l'espèce.

La durée moyenne de submersion admissible (fréquence annuelle) est d'après J. CONCARET de [67] p. 30 :

- 1 jour pour les cultures maraîchères,
- 9 jours pour les prairies,
- de durée plus importante et variable pour les arbres.

a- Cas des Polders fluviaux [40]

La suppression de vastes zones inondables sur le cours récemment CANALISE du Rhin Supérieur a aggravé les crues en aval. Suite à la crue de 1982-83, l'Allemagne et la Hollande ont demandé à la France le rétablissement du niveau de protection antérieur par la REMISE EN INONDATIONS de l'ancien champ majeur, et donc des surfaces fluviales appelées "POLDERS" (figure 27).

Les études d'impact et observations de terrains ont conduit à proposer une réouverture des Polders aux seules fins d'écrêtement des crues.

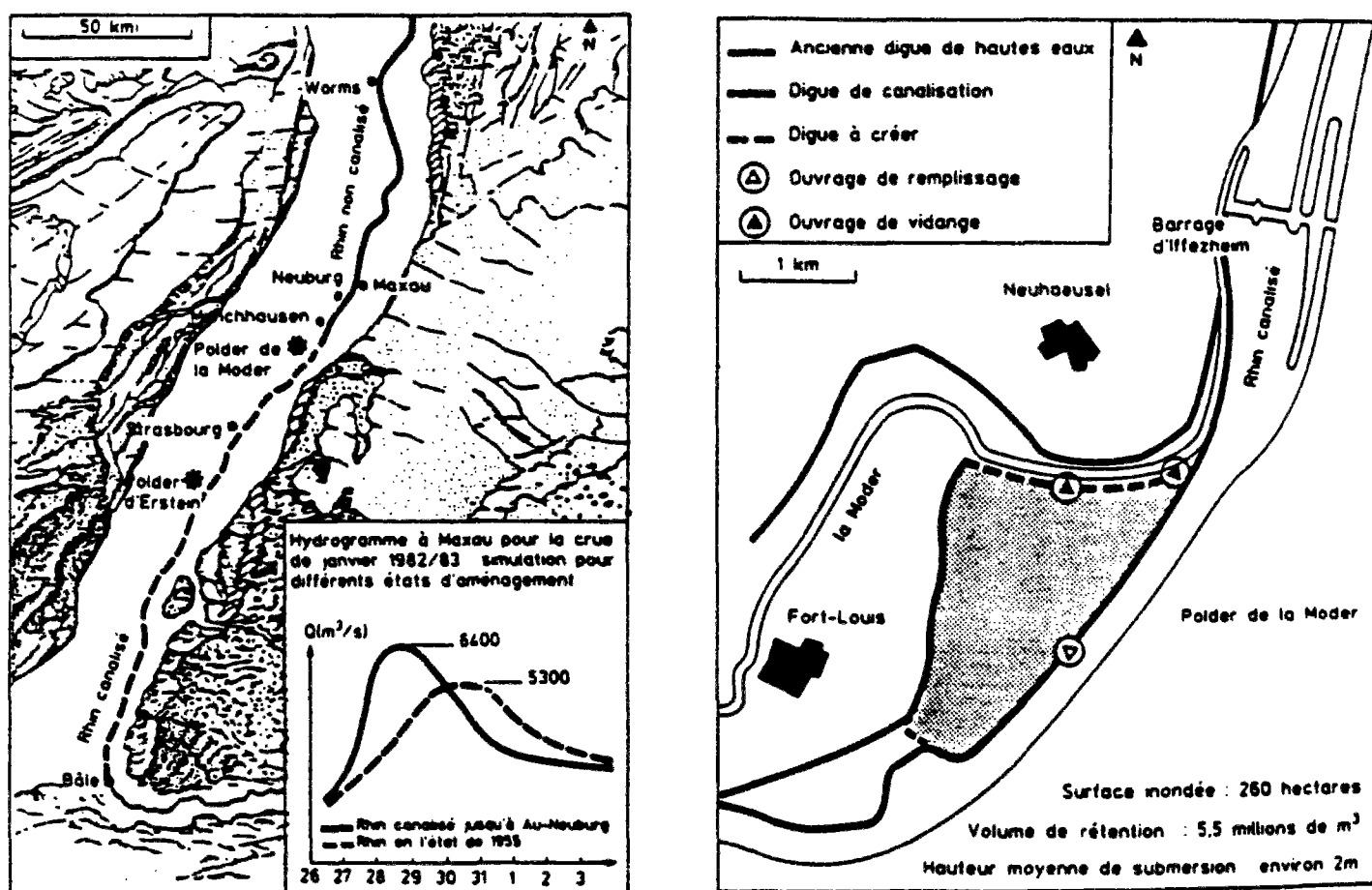
Des études précises ont été menées par le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Strasbourg (1986) sur les Polders du Rhin Supérieur entre Bâle et Worms.

Ces études ont montré que les forêts riveraines des Polders avaient des durées de SUBMERSION maximales tolérées pour chaque type de végétation, avec des seuils différents selon que l'on avait affaire à une CHENAIE, une SAULAIE, une PEUPLERAIE, des VASIERES, ou à une zone de VEGETATION AQUATIQUE.

D'après les travaux de MM. CARBIENER, DILLMANN et DISTER [40], la durée d'immersion possible est, en nombre de jours d'inondations par an :

- ormes, frênes	25 à 75 jours,
- saulaies et peupleraies	100 à 350 jours,
- saulaie blanche	100 à 200 jours,
- végétation de vasières	150 à 300 jours,
- végétation aquatique	250 à 350 jours.

Cet exemple confirme que certaines zones peuvent avoir des fonctions importantes dans la rétention des eaux de ruissellement et que ces surfaces participent à l'équilibre hydrologique de toute une région.



1 - Le Rhin supérieur canalisé : augmentation des débits de pointe et plus grande vitesse de propagation des crues.

2 - Polder de la Moder: la mise en eau temporaire, au moment opportun, permettra d'amorcer l'onde de crue.

Figure 27 : Ecrêtement des crues du Rhin - Les polders fluviaux (extrait de l'Étude d'Impact du Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Strasbourg) [40]

1.3 - LA PREVISION DU RUISSELLEMENT

1.3.1. DE LA FORMATION DU RUISSELLEMENT EN MILIEU AGRICOLE

L'agriculture s'interroge sur l'action du ruissellement face à l'érosion qu'il occasionne sur les sols cultivés. Devant le développement et l'amplitude du phénomène d'érosion et de destruction des terres, élus et agriculteurs ont été contraints d'envisager de nouveaux moyens pour maîtriser le ruissellement en zone rurale.

Nous retiendrons les recherches suivantes :

a- B. PAULET , Ingénieur du GREF, Ministère de l'Agriculture, Direction de l'Aménagement [158] dans la revue du Génie Rural d'Octobre 1986 "Quand la pluie emporte les sols" confirme les rapports qui existent entre :

- le ruissellement sur sol agricole.
- l'érosion des terres, leur destruction, le transport d'éléments fertilisants, l'envasement des surfaces d'aval, les inondations de villages d'aval et le colmatage des réseaux d'assainissement urbains.

Il préconise, en parallèle :

1. des mesures hydrauliques à la parcelle pour contenir le ruissellement, telle la réorganisation des conducteurs linéaires de ruissellement concentré (dérayures, fossés, talus, haies) qui ont été détruits par le remembrement ou abandonnés par la déprise agricole ;

2. des mesures agronomiques de couverture végétale intercalaire en hiver sur des sols nus (cultures dérobées ou engrais vert) ou le maintien en place des résidus de culture (non-déchaumage) pour faire face aux cultures intensives ;

3. enfin les risques de tassement avec des engins trop lourds qui compactent le sol et l'imperméabilisent.

Face aux développements des quantités de ruissellement, des catastrophes sont survenues dans la région de CANTHE-AUTHIE. En 1979, le village de Saint-Valery-en-Caux a été inondé par un ruissellement agricole. Depuis, il a été établi des défenses d'intérêt collectif.

Pour l'auteur, la formation du ruissellement à risque est liée aux pratiques agricoles citées plus haut. Le ruissellement apparaît sur des pentes voisines de 1 % et sur des sols très humides (hiver, printemps) et dénudés.

Une description des phénomènes du ruissellement peut s'établir en suivant les phénomènes d'érosion.

"Les effets de l'érosion hydrique commencent avec l'énergie de la pluie qui détruit les agrégats du sol sous l'impact des gouttes (effet SPLASH), réduit la perméabilité du sol et peut conduire à un glaçage total de la surface avec apparition d'une croûte de battance reconnaissable à son apparence plus claire - c'est l'érosion par nappe -".

Sur les terres nues et dont la couverture végétale est insuffisante, l'eau ruisselle en surface sans pouvoir pénétrer dans le sol imperméabilisé. La lame d'eau formée se concentre progressivement à l'aval de la parcelle en filets de ruissellement.

Alors commence l'érosion linéaire. Des griffes se forment. La circulation superficielle de l'eau arrache les particules de terre, des cheminements préférentiels creusent le sol, profitant des voies tracées par les passages de tracteur et d'outils. La rigole se transforme en ravine.

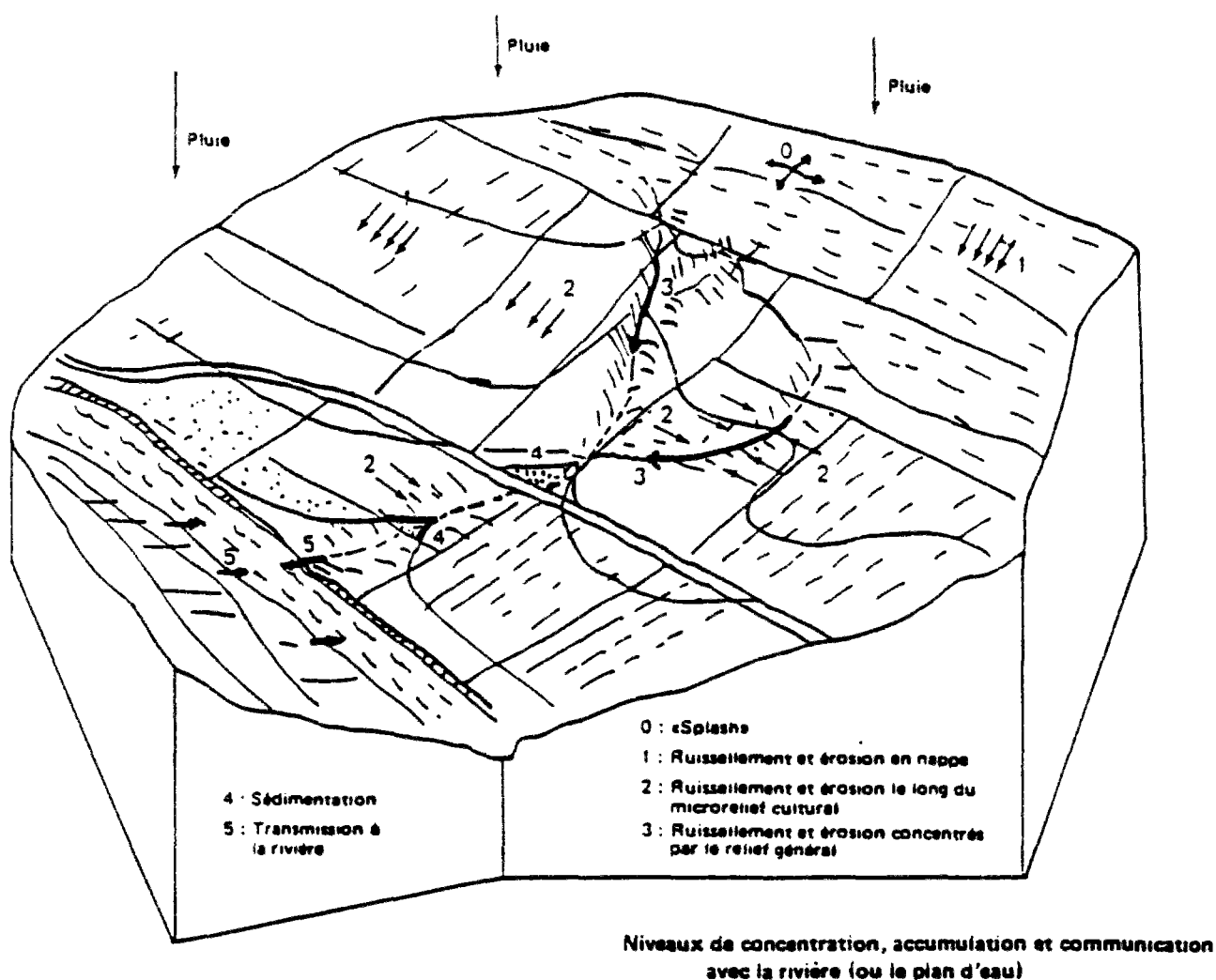
Le ruissellement par l'intermédiaire de l'érosion aboutit à un amoindrissement des potentialités des fertilités physiques et chimiques des sols.

On peut retenir des recherches de B. PAULET les idées suivantes:

- La maîtrise du ruissellement est l'unique solution contre l'érosion en zone agricole.
- Les terres avec une couverture végétale suffisent à stopper le ruissellement à la parcelle.
- Les parcelles agricoles peuvent générer des eaux d'inondations pour l'aval. Elles peuvent aussi générer des éléments de colmatage pour les réseaux d'assainissement.
- Un certain savoir-faire existait pour maîtriser le ruissellement (exemple des R.T.M. en montagne : Lois sur la Restauration des Terrains de Montagne du 19ème siècle favorisant le reboisement) mais il a été abandonné ou oublié lors des travaux de modernisation des terres agricoles à partir de 1970 (abandon des drainages de maîtrise de ruissellement, destruction des talwegs, des contre-pentes, etc.)
- Un attentisme ne peut être envisagé face à l'appauvrissement des sols, les terres agricoles risquant de disparaître.

b- Pour M. J.J. GRIL et G. LEYNAUD, du CEMAGREF, groupe Antony "ressources en eaux" [103] les mécanismes de ruissellement et d'érosion sur les terres cultivées, sont intimement liés.

Le ruissellement représente l'écoulement d'un excédent d'eau à la surface du sol. Il s'organise progressivement en se concentrant à des niveaux successifs selon la terminologie suivante, développée par G. OBERLIN et J.J. GRIL en 1985 (figure 28).



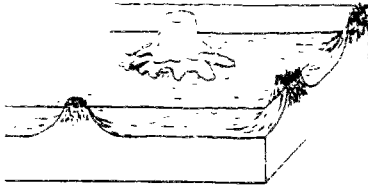
(1) Étude de B. DUVOUX et J.-J. GRIL, section «Qualité des eaux» du groupement d'Antony du CEMAGREF, 14 avenue de Saint-Mandé, 75012 Paris;

(2) G. OBERLIN, J.-J. GRIL, 1985, compte rendu de mission aux USA (Service de la Conservation des Sols et des Eaux), CEMAGREF, section «Qualité des eaux» du groupement d'Antony et division «Hydraulique - Hydraulique fluviale et souterraines» du groupement de Lyon du CEMAGREF.

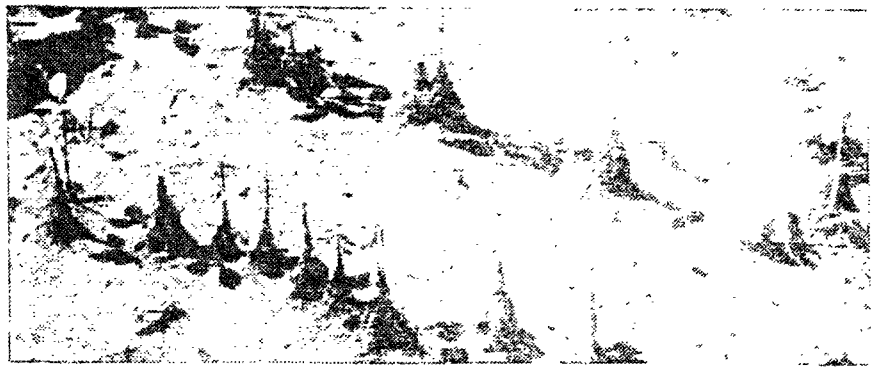
- 0 - le splash (battance)
- 1 - le ruissellement de nappe
- 2 - le ruissellement le long du micro-relief cultural
- 3 - le ruissellement concentré par le relief général de parcours
- 4 - le ruissellement de dépôt
- 5 - le ruissellement transmis à la rivière (exutoire qui peut être aussi un réseau d'assainissement)

Figure 28 : Définitions des mécanismes du ruissellement sur les terres cultivées (extrait de J.-J. GRIL et G. LEYNAUD [103])

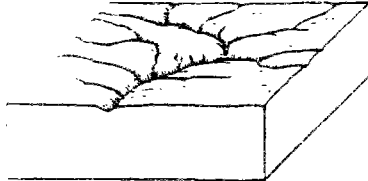
l'érosion en nappe...



... est l'érosion plus ou moins uniforme de la superficie d'un champ. Les racines des plantes, des arbres et les murets de culture se déchaussent de plus en plus.



l'érosion par rigoles...



... est l'accentuation des dépressions naturelles dues au ruissellement en surface. Les façons culturales masquent souvent les rigoles, mais une partie du sol est perdue.



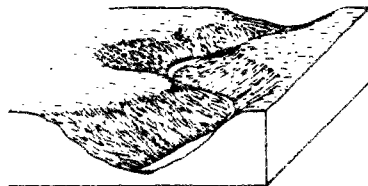
l'érosion par ravines...



... cause de profondes fissures dans des terres qui seraient cultivables. Les ravines creusent peu à peu la colline.



l'érosion des berges...



... transforme des cours d'eau profonds à courant rapide en rivières sinueuses bordées de grandes berges hautes. Ce a peut entraîner de graves pertes de terre cultivable.



Figure 29 : Terminologie pour l'érosion hydraulique
(Extrait courrier de l'Unesco (71)).

Cette terminologie a fait poids dans les recherches internationales car elle a été reprise par l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (F.A.O.) dans une publication "Conservation des sols en vue du développement".

c- La revue du Courrier de l'Unesco (Janvier 1985) a repris ces définitions de terminologie générale pour l'érosion hydraulique [71] en joignant aux termes des définitions photographiques (figure 29)

Une conséquence tout aussi grave du ruissellement est le déplacement des sédiments vers l'aval, entraînant des inondations, une moindre navigabilité des fleuves et l'ENVASEMENT DES BASSINS DE RETENUE et barrages.

1.3.2. LES ZONES DE RISQUES SENSIBLES AU RUISSELLEMENT

a- "L'érosion des sols cultivés sous l'action du ruissellement" de **V. AUZET**, CEREG - CNRS - Strasbourg [53], 1987, met en avant l'évolution, en France, des zones concernées par le ruissellement.

En 1950 (figure 30), les phénomènes d'érosion des sols par ruissellement correspondent approximativement aux zones climatiques méditerranéennes soumises régulièrement à de violents orages.

En 1986, les zones érodées sous l'action du ruissellement sont modifiées et se retrouvent au Nord de la France et à l'Ouest en Bretagne (figure 31), car l'action climatique n'est plus le seul vecteur du risque ruissellement.

L'étude diachronique de photos aériennes, réalisée par l'I.G.N. en 1983, sur le site de Ligescourt (Picardie), montre une évolution du parcellaire importante entre 1947 et 1965 liée au remembrement. En 1965, 50 % des parcelles ont plus de 4 ha, alors qu'en 1947, environ 5 % seulement excédaient 4 ha.

La modification spatiale du parcellaire entraîne donc une accélération de l'action du ruissellement sur les sols arables, amenant des conséquences multiples de détérioration aussi bien dans les zones rurales que dans les zones urbaines mitoyennes situées à l'aval.

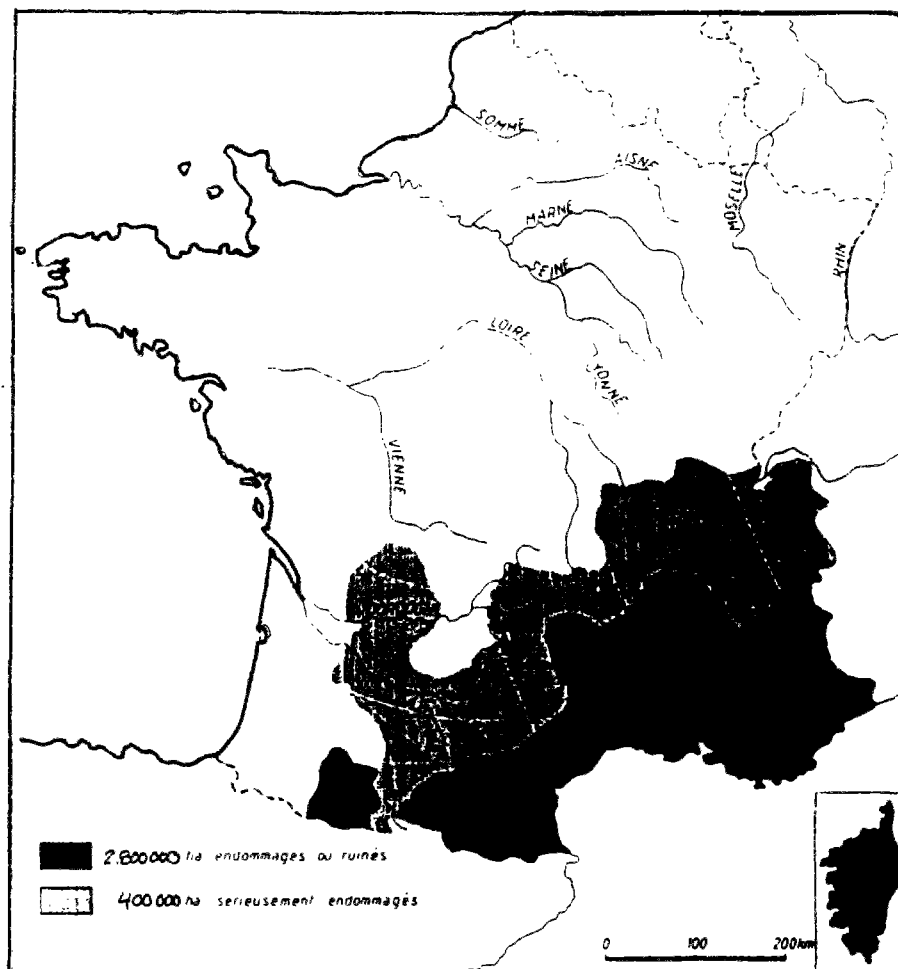


Figure 30 :

L'érosion des sols cultivés
en France
(extrait de V. AUZET, 53)

- Localisation des phénomènes d'érosion des sols par ruissellement en France métropolitaine : situation en 1950, d'après S. Hénin et T. Gobillot (1950).

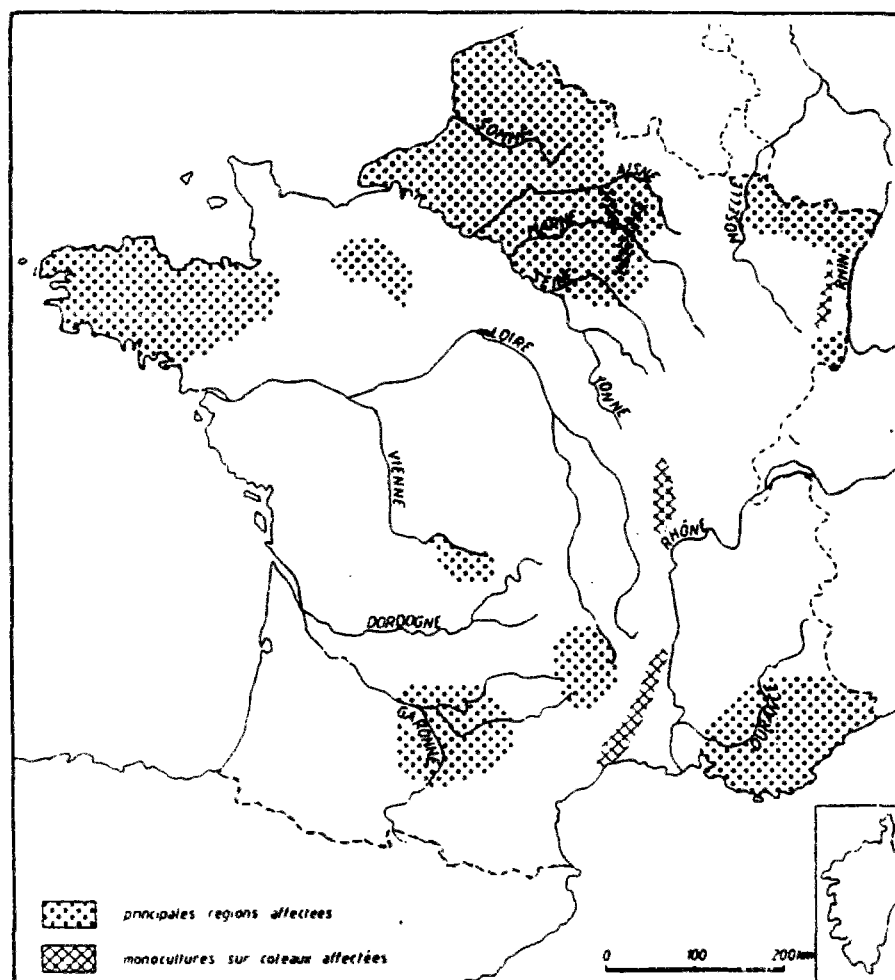


Figure 31 :

L'action du ruissellement
(extrait de V. AUZET, 53)

- Les phénomènes d'érosion des sols cultivés en France, sous l'action du ruissellement : situation en 1986, d'après la bibliographie existante.

L'étude mentionne la thèse de **M.J. BOIFFIN** (1984) [56] sur "la dégradation structurale des couches superficielles des sols sous l'action des pluies".

Les gouttes d'eau, particulièrement en sols limoneux, par le phénomène de la battance, ne s'infiltreront pas - suite à un émiettement trop poussé du travail du sol ou à cause d'un compactage à faible profondeur - et augmentent considérablement le ruissellement.

Les solutions préconisées au niveau des défenses concernent le rétablissement d'obstacles au ruissellement et la création d'un réseau de drainage efficace pour maîtriser le ruissellement, à condition bien sûr que ce réseau n'amplifie pas les quantités d'eau rejetées à l'exutoire par rapport à l'existant.

Concernant le ruissellement, les relations entre l'énergie cinétique de la pluie, la topographie, la micro-topographie, la morphologie du couvert végétal, ne sont pas réellement connues. A titre d'exemple, l'augmentation de la pente est considérée comme le facteur d'accroissement de la vitesse d'écoulement et de diminution de l'infiltration. **J. POESEN**, en 1984, [160] a démontré que l'augmentation de la pente diminuait la contrainte exercée sur le sol par les gouttes d'eau, et diminuait ainsi l'imperméabilisation de la surface par la battance.

Pour Véronique AUZET, l'étude de l'érosion par celle du ruissellement doit prendre en compte les aspects géomorphologiques, biologiques, climatologiques, hydrologiques et hydrauliques en liaison avec l'organisation et la mise en valeur de l'espace, en mettant en place des études sur des terrains réels et en étudiant mieux les relations entre événements climatiques et évolution de la couverture végétale.

Comme on peut le constater, la complexité de ces paramètres semble être une des raisons du déficit d'études sur le ruissellement.

b- Pour en revenir aux données nationales, **Jean MARGAT**, Ingénieur Géologue et **Claude TRUCHOT**, Ingénieur du GREF, Secrétariat d'Etat à l'Environnement dans les Annales des Mines, "La gestion de l'eau" [138] étudient les sources de l'eau et donc les données des écoulements de surface pour la France (figure 32). 180 milliards de m³ d'eau s'écoulent, ruissellent ou s'infiltreront, en moyenne contre 440 milliards de m³ d'eau de pluie ou de neige. Pour les années de sécheresse décennale, ce sont encore 120 milliards de m³ qui s'écoulent en surface.

Les lieux d'apports annuels d'eaux superficielles ont une certaine CORRELATION avec la carte des zones affectées par les phénomènes d'érosion par ruissellement.

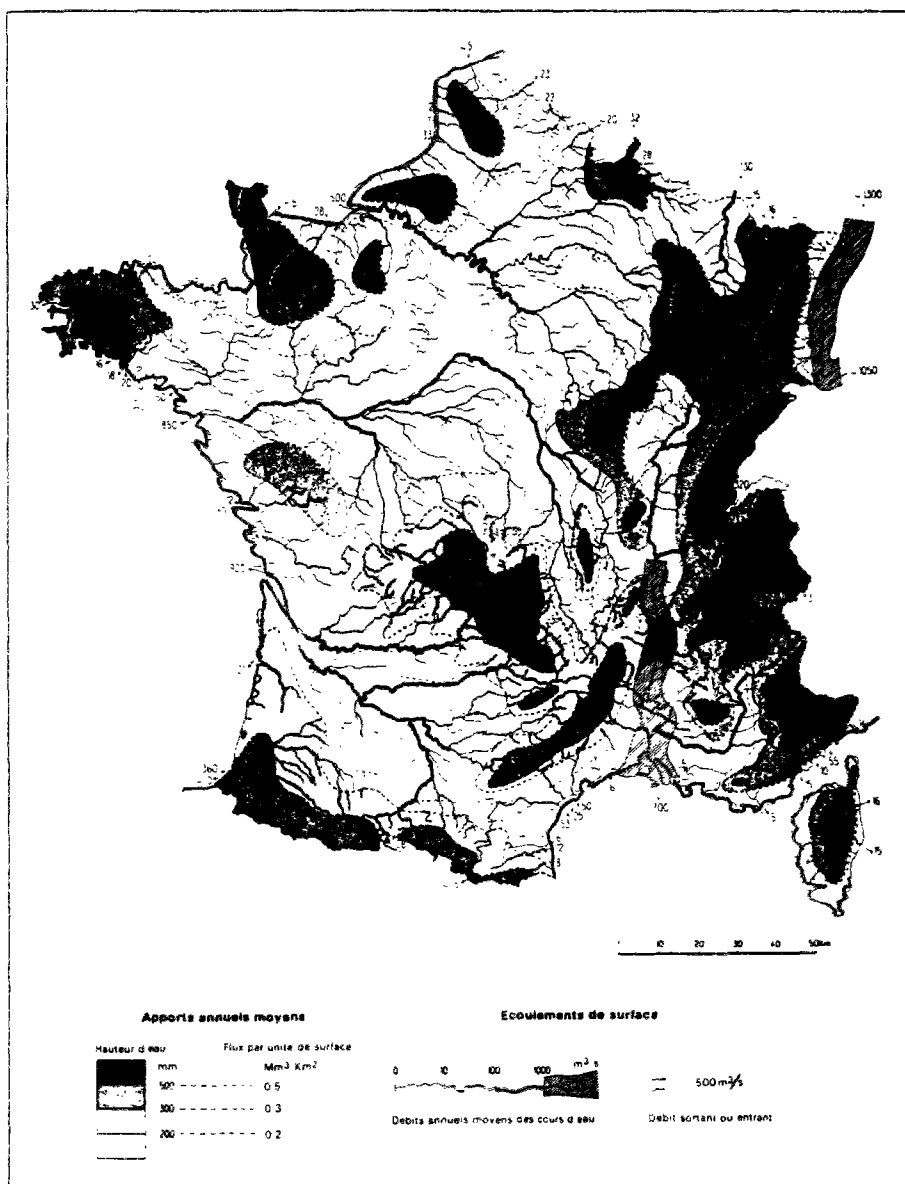


Figure 32 : Apports d'eau et écoulements annuels moyens en France (extrait du texte "L'eau en France" de Jean MARGAT et Claude TRUCHOT, Revue Annales des Mines, Juillet-Août 1988)

c- Le document suivant permettra de mieux comprendre les variations du ruissellement en fonction des différences des pluies. Nous retenons le tableau synoptique du livre de **P. HARREMOES** et **J. BRUMMER** [112], p.134 (figure 33).

La pluie peut se définir par ses intensités et par l'évolution de l'événement pluvieux. La pluie type "Chicago", prise comme base dans beaucoup de recherches (Canada, U.S.A. ...) a la forme n°8. L'événement parisien du 27 Juin 1990 pourrait plutôt prendre la définition n°3.

1.3.3. DE LA FORMATION DU RUISSELLEMENT EN MILIEU FORESTIER

a- L'étude de **C. GRIOLET**, du Service Régional d'Aménagement des Eaux de Lorraine à METZ, [104], "l'altération du régime hydrologique de sources karstiques à la suite de coupes à blanc étoc" (1985), apporte un nouvel éclairage sur la formation du ruissellement en milieu forestier par rapport aux recherches urbaines et agricoles.

C. GRIOLET a mené en Forêt de Hesse (Meuse) pendant 4 ans une comparaison du régime hydrologique entre un bassin versant largement affecté par des coupes à blanc étoc* et un bassin versant non déboisé (figure 34).

L'utilisation de METHODES NATURALISTES, avec l'analyse des boucles d'hystérésis⁽¹⁾, liées aux METHODES STATISTIQUES⁽²⁾ avec le cumul de résidus⁽³⁾, a permis de mesurer l'évolution de l'évaporation réelle et le volume du ruissellement.











Les résultats obtenus sont les suivants : l'impact des coupes à blanc étoc se traduit par une diminution de l'évapotranspiration réelle, qui passe de 527,6 mm à 461,0 mm, et une augmentation du ruissellement, qui passe de 170,1 mm à 298,4 mm (tableau 35).

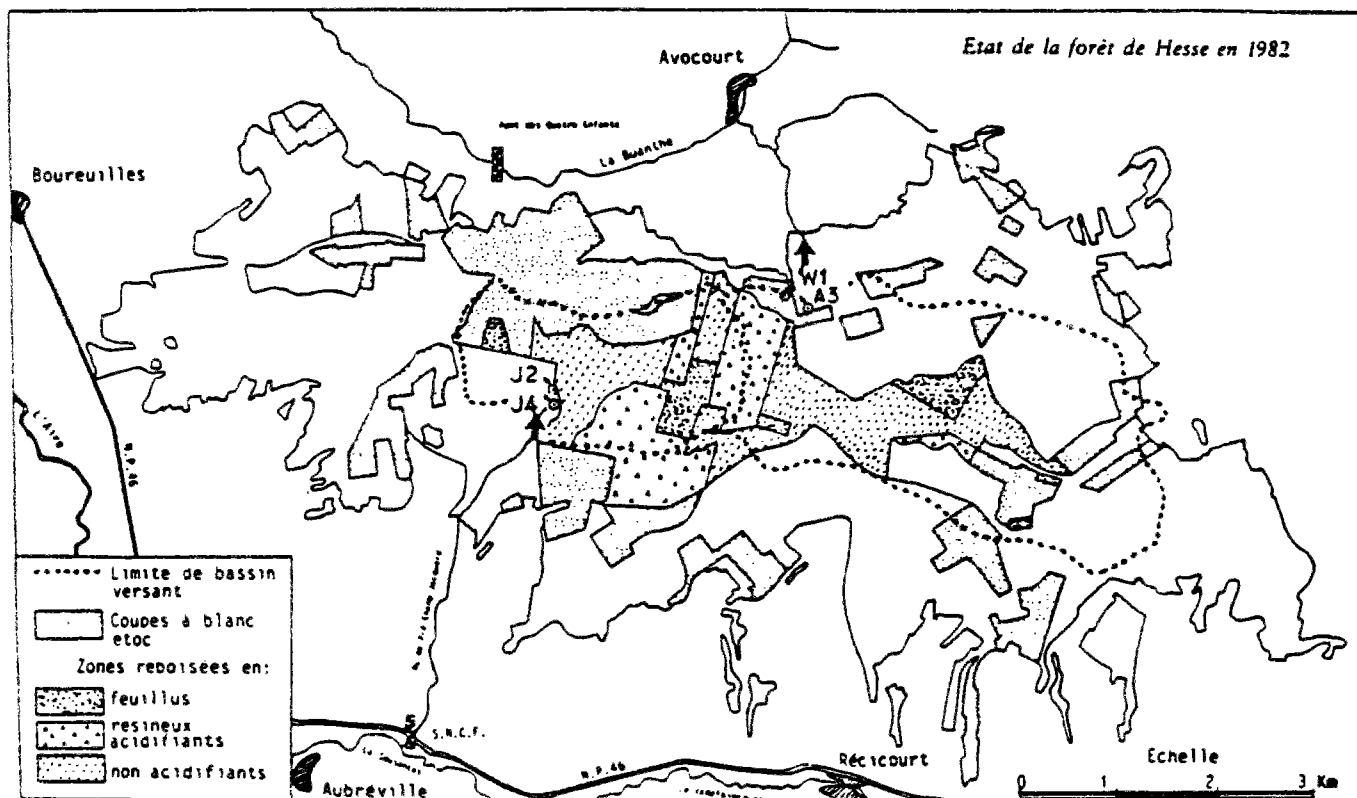
* Une coupe à blanc étoc est une coupe généralisée d'une parcelle laissant en place les souches des arbres

(1) Relation entre 2 courbes qui ne se recouvrent pas, la courbe de désorption où le sol sèche à partir d'un état de saturation et la courbe de sorption où le sol s'humidifie progressivement à partir d'un état de dessiccation. La teneur en eau est plus élevée en désorption qu'en sorption.

(2) Méthodes statistiques : ensemble de méthodes mathématiques qui, à partir du recueil et de l'analyse de données réelles, permettent l'élaboration de modèles probabilistes autorisant les prévisions.

(3) Cumul des résidus : une des méthodes d'induction (généralisation d'une observation ou d'un raisonnement établis à partir de cas particuliers) qui consiste à retrancher d'un phénomène la portion dont on connaît déjà les causes, afin de trouver par élimination les causes de la portion restante.

Type	Description
1)	 <p>relatively constant flow, little intensity variation</p> <p>Débit relativement constant avec une petite variation d'intensité</p>
2)	 <p>un total flow increasing, monoton intensity increase</p> <p>Dans le débit total, accroissement régulier de l'intensité</p>
3)	 <p>un total flow declining, monoton intensity decrease</p> <p>Dans le débit total, diminution régulière de l'intensité</p>
4)	 <p>marked peaks at the beginning, abruptly declining</p> <p>Pic très important en début de pluie et décroissance brutale de la pluie</p>
5)	 <p>rapid increase, marked peak section and gradual decline</p> <p>Croissance rapide puis décroissance lente de la pluie</p>
6)	 <p>gradual increase up to marked peak, rapid decline</p> <p>Croissance lente puis décroissance rapide de la pluie</p>
7)	 <p>long, weak increase marked end-phase</p> <p>Accroissement lent et faible jusqu'au pic</p>
8)	 <p>long peak section or several short consecutive peak intensities</p> <p>Un long pic au milieu entouré de courtes pluies</p>
9)	 <p>several peak intensities with lower middle section</p> <p>Deux grands pics entourant de faibles pluies</p>
10)	 <p>enduring level of intensity and gradual decline</p> <p>Un pic long avec diminution graduelle</p>



Le site de recherche est un bassin versant de 364 hectares constitué de feuillus : hêtres, aulnes, érables, chênes.

De 1979 à 1982, la superficie déboisée est passée de 672 ha à 904 ha, immédiatement reboisée en feuillus (52 ha), résineux acidifiants (173 ha) et résineux non acidifiants (297 ha) (figure 34).

Les données climatologiques ont été enregistrées à la station d'Avocourt et les quatre années retenues pour l'étude ont été 1979 à 1982. L'équipement du site s'est caractérisé par 10 points de mesures (5 sources, 2 rivières, 3 ruisseaux). Les données relatives aux débits ont été obtenues par transformation des lectures d'échelle grâce aux courbes de tarage, des déversoirs à lame mince et des sections de jaugeage⁽¹⁾.

Les résultats :

En s'appuyant sur le calcul du bilan hydrologique $P = Q + E_r + \Delta R$

où P représente les précipitations en mm, Q les écoulements en mm de la période intéressée, ΔR la variation des réserves stockées sur le bassin.

Si la variation des réserves est faible devant les autres termes, le bilan se réduit à $P = Q + E_r$ et alors le déficit d'écoulement (D) est égal à l'évapotranspiration réelle (E_r)

Etat comparatif de l'occupation du sol (superficies en hectares)

Bassin versant	Années	Forêts	Coupes à blanc (ha)	Reboisement (jeunes arbres)
Limnigraphe	1979	134,5	130	99,5
	1982	17,5	80,7	265,8
J2	1979	61,3	28,7	0
	1982	17,5	49,0	23,5

Bilan d'eau du bassin de la source J2

Années	P (mm)	E_r (mm)	Q (mm)	
			infiltration	ruissellement
1979-1980	831,5	527,6	133,8	170,1
1981-1982	910,1	461	150,7	298,4

Figure 35' : Tableau figurant l'évolution de l'infiltration et du ruissellement entre une parcelle plantée et une parcelle avec coupe à blanc (extrait de l'étude de C. GRIOLET "L'altération du régime hydrologique de sources karstiques à la suite de coupes à blanc étoc" [104])

⁽¹⁾ détermination d'un volume écoulé par seconde d'un cours d'eau

Les débits journaliers, obtenus par transformation des hauteurs enregistrées grâce à la courbe de Tarage⁽¹⁾, permettent de calculer la lame d'eau écoulée pour chacune des trois années d'étude sur le bassin versant de l'expérience.

La courbe de tarissement observée en début puis en fin d'année à l'étiage, permet le calcul des volumes d'eau stockés sur le terrain et donc de la variation des réserves.

- L'évapotranspiration :

Une recherche antérieure de BURGER (Suisse 1954) avait constaté que l'évapotranspiration moyenne annuelle - sur une période de 25 ans - représentait 53 % des précipitations sur un bassin boisé à 99 % (Sperbelgraben) mais seulement 41 % sur un bassin à taux de boisement égal à 33 % (Rapengraben).

Dans l'expérience de C. GRIOLET, l'évapotranspiration réelle représente 63 % des précipitations en 1979-1980 et 51 % en 1981-1982, avec un taux de déboisement variable et un taux de reboisement de jeunes plants passant de 27 à 73 %.

- L'écoulement :

La LAME D'EAU écoulée représente 36,5 % des précipitations pour 1979-1980, 42 % pour 1980-1981 et 49,4 % pour 1981-1982, regroupant les écoulements de surface et les écoulements souterrains (débits de sources).

A une augmentation des coupes à blanc, pour le secteur de la source J2 passant de 28,7 à 49 hectares sur 3 ans, correspond une augmentation du ruissellement annuel qui passe de 170,1 mm à 298,4 mm.

Il en ressort que le ruissellement forestier se forme dès qu'il y a absence du couvert forestier et qu'il est proportionnel au taux de déboisement ; les jeunes arbres nouvellement plantés n'ont pas le même pouvoir sur le ruissellement qu'un couvert forestier adulte, puisque le ruissellement a augmenté bien qu'il y ait eu reboisement (de 0 à 23,5 ha pendant la période expérimentale) (tableau 35).

1.3.4. DE LA FORMATION DU RUISSELLEMENT EN MILIEU URBAIN

a- Au niveau des recherches sur l'origine du ruissellement en milieu urbain, **Michel DESBORDES, Jean Claude DEUTSCH et Antoine FREROT**, dans la revue "La Recherche" numéro spécial de Mai 1990, rappelle la situation pour la France, des eaux de pluie dans les villes [82].

Le Laboratoire d'Hydraulique Mathématique de l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc à Montpellier (L.H.M.) gère depuis plusieurs années des tests, expériences, recherches sur le ruissellement urbain en laboratoire.

(1) Courbe permettant la lecture de l'évolution graphique du débit d'un cours d'eau en fonction de la hauteur d'eau mesurée.

Comme le rappellent les auteurs, l'hydrologie urbaine est une nouvelle discipline. Les recherches hydrologiques sont consacrées à l'étude de la transformation des pluies en ruissellement sur les bassins versants urbanisés ; elles visent à déterminer, de façon précise, la quantité d'eau de pluie à évacuer et l'influence du développement de l'urbanisation sur ces quantités.

Des modèles mathématiques ont permis de calculer les débits ruisselés en fonction de la variation de l'intensité de la pluie dans le temps.

Le modèle du "Réservoir linéaire" (stockage de l'eau proportionnel au débit du ruissellement sur un bassin versant urbain) reproduit assez correctement les hydrogrammes de ruissellement observés.

Les caractéristiques des bassins versants urbanisés peuvent être simplifiées par rapport aux bassins versants ruraux. Nous ne pouvons avoir que la pente, la longueur et l'imperméabilisation.

Le problème principal demeure, pour les auteurs, le problème de la pollution du ruissellement urbain. Pour évaluer cette pollution, une expérience de 18 mois a été faite par le L.H.M. qui a relevé, à chaque pluie, un échantillonnage d'eaux ruisselées urbaines, sans aucun apport d'eaux usées.

L'étude démontre l'importance des M.E.S. (Matières en suspension) dont la charge annuelle dépasse une tonne par hectare. De même, les concentrations de plomb peuvent atteindre 1 à 2 mg/l. (figure 36).

POLLUTION DES EAUX PLUVIALES URBAINES							
concentration (mg/l)					charges annuelles (kg/ha)		
		MES	DCO	Pb	MES	DCO	Pb
réseau séparatif	min	21	33	0,03	347	22	0,09
	max	582	265	3,1	2340	703	1,91
réseau unitaire (déversoir d'orage)	min	237	120	0,15	1230	1760	
	max	635	560	2,9	4917	3256	
autoroute	min	28	128	0,15	121	181	0,65
	max	1178	171	2,9	1289	3865	13
zones résidentielles	min	112	37	0,09	620	22	0,06
	max	1204	120	0,44	2300	761	1,91
zones commerciales	min	230	74	0,1	50	1000	0,17
	max	1894	160	0,4	840	1029	684

Les eaux de pluie, qui lessivent les villes, sont polluées et contribuent à dégrader la qualité des eaux des rivières, des lacs ou de la mer. Pour quantifier cette pollution, de nombreuses mesures des paramètres de pollution ont été effectuées dans le monde. Ce tableau rassemble les résultats d'observations réalisées en Europe, aux Etats-Unis et en Australie. Il donne les plages de variation des valeurs moyennes de concentration lors d'une précipitation, et les charges moyennes annuelles en MES (matières en suspension), DCO (demande chimique en oxygène) et en plomb. On peut remarquer l'importance des MES dont les charges annuelles déversées peuvent dépasser deux tonnes par hectare, avec des concentrations moyennes lors d'une pluie pouvant atteindre près de 2g/l.

Figure 36 : La pollution du ruissellement urbain.
[82] extrait de la revue "La Recherche"
numéro spécial "L'EAU" Mai 1990

Pour la gestion des inondations, c'est-à-dire la gestion quantitative, des progrès ont été accomplis par les techniques de stockage (bassin de retenue en eau et à sec), les chaussées poreuses, les techniques de ralentissement (fossés, drains, puits filtrants), les techniques alternatives. La revue cite la ville nouvelle de "Woodlands" (U.S.A.) où toute l'urbanisation s'appuie sur les contraintes hydrologiques et où le résultat est de ne plus avoir de problèmes de ruissellement.

L'article signale aussi que l'urbanisation, même sans extension, est soumise à des MODIFICATIONS SPATIALES INTERNES (intra-muros) importantes. Le phénomène de comblement des espaces libres, le remplacement de l'habitat pavillonnaire par de l'habitat collectif, en augmentant les surfaces d'imperméabilisation, remet en cause automatiquement "l'équilibre antérieur" des réseaux hydrauliques et crée de nouveaux risques d'inondations.

C'est la raison pour laquelle, d'ailleurs, nous ne sommes pas aussi optimistes que les auteurs qui assurent que la gestion quantitative du ruissellement est en bonne voie.

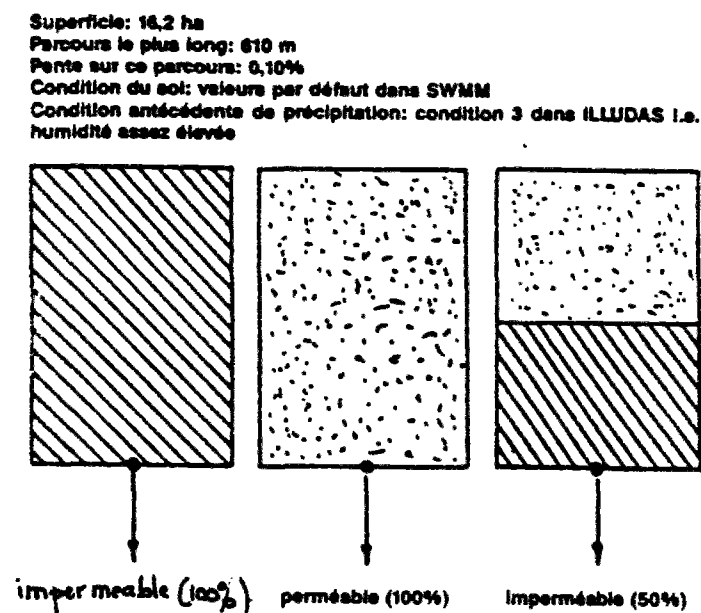


Figure 37 : Analyse du ruissellement sur un bassin-versant évolutif décomposé en 3 zones (extrait de Pierre LEMIEUX, dans la revue "Sciences et Techniques de l'eau" de mai 1985, Québec [136])

1.3.5. CALCUL DU RUISSELLEMENT POUR LA PREVISION EN MILIEU URBAIN

Nous avons choisi de retenir une étude spécifique pour présenter le calcul du ruissellement urbain dans la prévision, et qui nous a aidé dans l'élaboration du chapitre 4.

Les méthodes de prévision passent par des techniques de modélisation liées à l'informatique.

L'étude retenue est celle de M. **Pierre LEMIEUX** [136] de l'Université de Montréal, Québec (département du Génie Civil) dont les principes ont été résumés dans la Revue "Sciences et Techniques de l'Eau" de Mai 1985 sous le titre "Considérations sur l'utilisation d'un modèle de ruissellement urbain pour la gestion des eaux pluviales".

Pour Pierre LEMIEUX, la méthode rationnelle de l'élimination rapide du ruissellement de surface avec un transport à l'exutoire par un système souterrain de conduites, utilisée du XIXème siècle jusqu'à tout récemment, a conduit à beaucoup de déboires dans le drainage urbain.

- Le grand défaut de cette méthode est de régler les problèmes du sous-bassin concerné, sans se préoccuper des EFFETS NEFASTES sur l'aval.

- Cette méthode "rationnelle" ne tient pas compte aussi des MODIFICATIONS du milieu urbain ; l'urbanisation s'est propagée de l'exutoire du bassin de drainage vers son amont.

Face à ces deux "oublis", le système d'égout pluvial s'est trouvé surchargé par les apports des ajouts qui se sont fait à mesure que l'occupation des sols s'accroissait vers l'amont.

Les SURCHARGES et les faits ont donc forcé la révision de la philosophie.

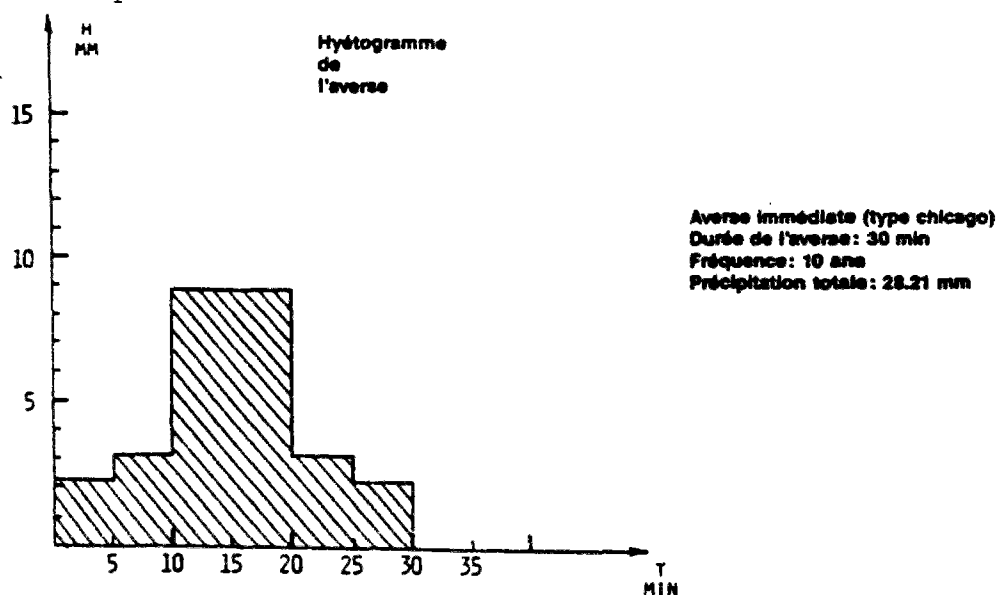


Figure 38 : Hyétogramme d'une averse (extrait de Pierre LEMIEUX [136])

C'est alors que sont nés les modèles de ruissellement, outils informatisés, pour mieux répondre aux modifications causées par l'occupation PROGRESSIVE AVAL-AMONT des sols. Les premiers modèles ont servi au contrôle quantitatif du ruissellement ; depuis peu s'ajoutent les modèles qualitatifs destinés au contrôle de la qualité des eaux de ruissellement urbain.

1.3.5.1. L'EXEMPLE DES EFFETS DE L'OCCUPATION PROGRESSIVE DU SOL

Au niveau de l'expérimentation, le Département du Génie Civil de l'Université de Montréal a appuyé ses expériences de modélisation sur l'analyse d'un bassin versant urbain évolutif (figure 37) 100 % état naturel, 50 % imperméable, 100 % imperméable.

Il en a conclu que, lorsqu'il y a urbanisation d'un nouveau site, il y a moins d'eau infiltrée dans le sol, moins d'eau RETENUE par la végétation, moins d'eau retenue dans les petites dépressions superficielles naturelles et il y a accélération du ruissellement à la surface du sol et augmentation du volume de ruissellement.

L'expérimentation a pris comme champ d'application un bassin de drainage rectangulaire, avec une superficie totale perméable à l'ETAT NATUREL ou à l'ETAT INITIAL (i.e.)⁽¹⁾ avant urbanisation :

Superficie du Bassin : 16,2 ha

Caractéristiques hydrologiques :

- longueur du parcours hydrauliquement le plus long : 610 m
- pente sur cette longueur : 0,1 %
- nature du sol
- condition antécédente de précipitation : sol relativement humide : 12 à 25 mm d'eau dans les 5 jours précédents (condition 3 dans le modèle ILLUDAS)
- averse du type Chicago - durée 30 minutes - fréquence d'occurrence de 10 ans basée sur la courbe intensité - Durée de Sherbrooke.

Les hydrogrammes de ruissellement direct des cas d'imperméabilisation ont été obtenus à l'aide d'un programme de calcul (ILLUDAS) (figure 39).

Les résultats de l'expérience sont les suivants :

- L'hydrogramme résultant de l'averse sur le bassin totalement perméable (ou à 0 % d'imperméabilisation) présente un débit de pointe de 0,3 m³/s et un volume de ruissellement correspondant à une hauteur d'eau de 8,21 mm sur l'aire du bassin (figure 40).

⁽¹⁾ i.e. : initial establishment - Les données d'origine

Débit de pointe

m^3/s

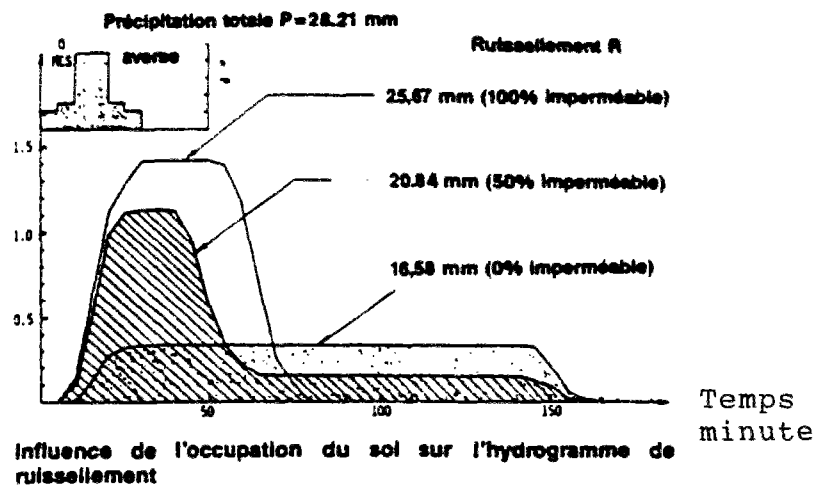


Figure 39 : Les 3 hydrogrammes de ruissellement (extrait de P. LEMIEUX [136])

CALCUL DE RUISSELLEMENT

OCCUPATION DU SOL	DEBIT DE POINTE	VOLUME RUISSELLE ^T hauteur d'eau	LAPS DE TEMPS D'EVACUATION
végétation dépressions naturelles infiltration	0,3 m^3/s	8,21 mm	180 minutes
urbanisation à 50%	1,1 m^3/s	20,84 mm	180 minutes
urbanisation à 100%	1,4 m^3/s	25,67 mm	80 minutes

Figure 40 : Variation du ruissellement en fonction de l'imperméabilisation des sols
(Synthèse établie par M. GUITON sur la base de l'étude de P. LEMIEUX [136])

La forme allongée de l'hydrogramme souligne l'effet d'EMMAGAZINEMENT NATUREL de l'eau retenue par la végétation et les petites dépressions superficielles, ainsi que le retrait de l'eau infiltrée dans le sol.

- L'hydrogramme résultant de la même averse sur le bassin à 50 % d'imperméabilisation montre un débit de pointe de $1,1 \text{ m}^3/\text{s}$ avec un volume de ruissellement de 20,84 mm. La forme de l'hydrogramme donne déjà un bon aperçu du rôle joué par l'urbanisation dans la modification du processus hydrologique du Bassin. La moitié urbanisée du bassin ne permet plus l'emmagasinement naturel mais permet par contre une accélération de l'écoulement de surface. La partie allongée provient de l'autre moitié perméable du bassin ; elle est moins importante que dans le cas précédent.

- La rupture se trouve dans le 3ème cas au niveau de l'accélération de la vitesse de ruissellement. L'hydrogramme afférent à la même averse dans un bassin extrêmement urbanisé (100 % imperméable) donne un débit de pointe de $1,4 \text{ m}^3/\text{s}$ avec un volume de ruissellement de 25,67 mm. Le volume total de ruissellement est complètement évacué dans un laps de temps de 80 minutes alors qu'il fallait un peu plus de 180 minutes dans les deux premiers cas (figure 40).

Les conséquences de l'urbanisation sur le régime hydrologique sont les suivantes :

- diminution de l'emmagasinement naturel du bassin
- accélération du phénomène de ruissellement sur la surface du bassin
- accroissement considérable du débit de pointe de l'hydrogramme
- accroissement marqué du volume d'eau ruisselée

1.3.5.2. LES MODÈLES DE RUISELLEMENT :

Les modèles de ruissellement ont été créés pour simuler un événement et donc le prévoir. Ils sont liés à l'introduction de l'informatique dans la recherche.

Les modèles de ruissellement nécessitent l'introduction d'un HYETOGRAMME pour décrire un orage ou une averse que l'on appelle PLUIE DE PROJET. Il peut s'agir alors, soit d'un hyétogramme synthétique, soit d'un hyétogramme associé à une averse réelle typique.

L'idée d'un ORAGE DE PROJET consiste à estimer, soit un débit de pointe, soit un volume de ruissellement ayant une fréquence d'occurrence déterminée par la planification (10 ans, 50 ans, 100 ans).

Premier constat, l'hyétogramme de type Chicago, très utilisé dans toutes les modélisations, se révèle peu utile pour déterminer les dimensions des bassins de rétention, car il ne génère pas forcément des averses de longues durées et créatrices de gros volumes de ruissellement.

D'autre part, un orage réel ne génère pas nécessairement un volume de ruissellement associé à une fréquence d'occurrence imposée.

L'orage synthétique constitue un aspect de modèle de ruissellement généralement accepté car il se génère rapidement.

L'auteur conseille, pour le choix entre un orage réel et un orage synthétique, d'utiliser l'orage synthétique pour les études préliminaires d'un drainage urbain (ou drainage pluvial) qui déterminent les dimensions des ouvrages.

Mais il conseille aussi de VERIFIER le comportement du système de drainage à l'aide d'orages réels historiques et d'appliquer les correctifs qui s'imposent à l'étude initiale.

1.3.5.3. LE CHOIX DU MODÈLE DE RUISSELLEMENT :

Pour l'Université de Montréal, les modèles de ruissellement, qui sont nombreux, se divisent en 3 grandes classes :

- les modèles macroscopiques,
- les modèles intermédiaires,
- les modèles microscopiques.

• Les modèles macroscopiques :

Ils considèrent globalement une aire de drainage à l'aide d'un COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT ou d'un hydrogramme unitaire.

Au Québec, le modèle utilisé est le modèle STORM. Il permet une simulation continue et est utile au niveau de la planification.

• Les modèles intermédiaires :

Ils ouvrent la voie à la subdivision de l'aire de drainage en sous-bassins, grâce à une approximation cinématique⁽¹⁾ pour le calcul du ruissellement urbain et à une approximation cinétique⁽²⁾ du cheminement des hydrogrammes dans les conduites.

Dans ce groupe se retrouve le modèle ILLUDAS. Ce dernier génère le ruissellement de surface à l'aide d'une courbe aire-temps en tenant compte des pertes par rétention superficielle et par infiltration et propage l'hydrogramme de ruissellement dans les conduites par application d'une approximation cinétique basée sur la formule de Manning.

(1) relatif aux mouvements, composition des mouvements

(2) qui a le mouvement pour origine

- Les modèles microscopiques :

Ils permettent de subdiviser plus finement le bassin de drainage en un nombre fini de sous-bassins que l'on décrit par leurs caractéristiques géométriques et hydrauliques.

Le ruissellement de surface se calcule par une approximation cinématique tandis que le cheminement de l'hydrogramme utilise les équations dynamiques appropriées.

Ce genre de modèle se prête surtout à l'évaluation du comportement d'un système de drainage (modèle utilisé SWNN).

1.3.5.4. CRITIQUES DES MODÈLES

Pierre LEMIEUX [136] présente des critiques sur les modèles. L'utilisation des modèles est un choix difficile mais rien n'empêche de regrouper l'utilisation de différents modèles :

- Plus un modèle devient microscopique et plus la masse des données nécessaires devient considérable.

- "Avant de faire le choix d'un modèle spécifique, il est très important que le problème à étudier soit bien compris et que les objectifs visés par l'étude (protection cinquantennale par exemple) soient bien saisis, affirme l'auteur ; ce qui confirme que beaucoup de calculs de ruissellement soit faits en dépit du bon sens."

- "L'utilisation intelligente d'un modèle de ruissellement est plus importante que le choix lui-même" dit encore M. Pierre LEMIEUX, qui précise qu'il peut y avoir des utilisations stupides de modèles ...

- "Etalonnage, vérification et sensibilité" pour l'utilisation des modèles de ruissellement dit encore l'auteur (par étalonnage il faut entendre la manipulation des coefficients du modèle jusqu'à des résultats mesurés avec un degré de précision acceptable).

La VERIFICATION concerne la comparaison du modèle état naturel et du modèle calibré.

Quoi qu'il en soit, l'auteur préconise que la personne qui établit les calculs puisse comprendre et poursuivre elle-même le ramassage des données sur un terrain réel.

L'analyse de SENSIBILITE (la vérification) est indispensable une fois la solution obtenue à l'aide d'un modèle de ruissellement.

"Il faut tenir compte que certains coefficients peuvent être entachés d'un certain degré d'erreur". La prudence exige alors que l'on fasse varier les coefficients concernés afin de voir s'il faut apporter des modifications.

1.3.5.5. LA PRISE EN COMPTE DE LA POLLUTION DU RUISSELLEMENT

Devant l'ampleur de la pollution du ruissellement aussi bien rural (nitrates, pesticides, herbicides, fongicides ...) que du ruissellement urbain (M.E.S., métaux lourds, hydrocarbures, huiles, détergents, sels ...), il faut coupler les modèles de contrôle du ruissellement à ceux du contrôle de la qualité des eaux ruisselées.

Par exemple, devant l'importance des M.E.S. (Matières en suspension) dans les eaux de ruissellement, les ouvrages de détention, ceux qui emmagasinent temporairement le ruissellement, accompagnés par une relâche immédiate contrôlée de l'eau emmagasinée (aires engazonnées, stockage en eau, détention des toits, mails ...) doivent être conçus non seulement en fonction du contrôle des débits, mais en tenant compte des contraintes de dépollution.

Si un bassin de détention doit servir au dépôt d'une partie des matières en suspension, il faut alors assurer un temps de séjour permettant ces dépôts par un contrôle des débits de sortie de l'ouvrage. Le bassin devient alors un bassin de rétention, qui emmagasine le ruissellement avec une relâche retardée et contrôlée.

Si le contrôle de la qualité du ruissellement devient un objectif, ce qui n'est pas le cas encore, il faut alors revoir la conception de tous les ouvrages de contrôle quantitatif du ruissellement qui n'ont pas été construits pour cela.

1.3.5.6. LES BASSINS ET TECHNIQUES DE DÉTENTION⁽¹⁾

Pour ce qui est des problèmes issus de la création de bassins de détention, et ils existent lorsqu'on traite l'impact d'un ruissellement en créant un bassin de détention, on peut créer de nouveaux problèmes de ruissellement à l'aval, issus de cet ouvrage de contrôle.

Un groupe de bassins de détention peut fort bien résoudre les problèmes de refoulement de chacune de leurs zones respectives, tout en créant un nouveau problème de refoulement plus à l'aval par un effet combiné des DEBITS RETARDES.

En reprenant l'expérimentation sur les trois bassins urbains imperméabilisés à 0 %, 50 %, 100 %, l'auteur explique le phénomène d'apparition de nouveaux risques, alors que tous les risques semblaient avoir été prévus, calculés et réglés.

(1) Techniques de détention : action de détenir. Les bassins de détention participent à la rétention des refoulements par dérivation. Ils sont imperméables et assurent un stockage provisoire.
Techniques de rétention : action de retenir les eaux de pluies, en général avec la notion d'infiltration dans les pays anglo-saxons.

Sur le bassin à l'état naturel (imperméabilisé à 0 %), le débit de pointe de l'hydrogramme est de $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$. Si ce bassin s'urbanise totalement, et si on construit un bassin de détention ou que l'on mette en place des "solutions alternatives" de détention (mails, fossés ...) de telle sorte que le débit de pointe de l'hydrogramme de sortie soit toujours de $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$, les conditions hydrologiques de l'état naturel n'auront été que partiellement rétablies. En effet, cet hydrogramme aura le même débit de pointe, mais il sera plus long, car il doit tenir compte du volume accru du ruissellement dû à l'imperméabilisation, comme le montre la figure 41.

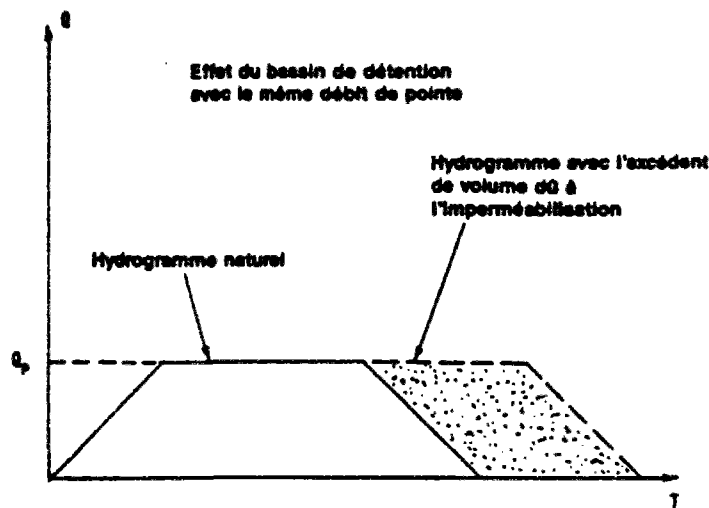


Figure 41 : Effet d'un bassin de détention et d'une urbanisation

En effet, un ensemble de bassins de détention, avec relargage immédiat, peut créer à l'aval un refoulement à cause de l'ADDITION de plusieurs de ces débits de pointe, lorsque les différents temps de parcours occasionnent l'occurrence⁽¹⁾ simultanée de plusieurs débits.

L'utilisation de modèles de ruissellement doit permettre de prendre aussi en compte l'effet néfaste des bassins de détention car ne pas les prendre en compte peut mettre la région, dans une FAUSSE SECURITE, précise P.LEMIEUX.

(1) apparition

1.3.6. LA PREVISION DU RUISSELLEMENT PAR LES METHODES NATURALISTES

Certaines recherches anglo-saxonnes arrivent à prévoir le ruissellement, non par calculs et modélisations mais par des techniques naturalistes, liées à des mesures et à l'observation géomorphologique du site.

Nous citerons, comme exemple, la recherche de **MM. D. HAGANS, N. WEAVER, M. MADEJ** [110], 1986, dont le champ d'expérimentation a été un bassin versant du Redwood National Park (Californie, U.S.A.) connu pour la présence de ses séquoias millénaires.

Les chercheurs ont pu déterminer l'origine du ruissellement, qu'elle soit d'origine naturelle (i.e)⁽¹⁾ ou issue d'activités humaines et, dans le cas présent, d'activités forestières.

L'expérience fait suite à la construction d'une route forestière en 1960 et aux conséquences de l'exploitation des bois jusqu'en 1980 avec le débardage, le tirage des grumes, les dépôts et les accès.

Le site était formé d'une certaine densité de drainage naturel, d'une longueur de 4,1 km à 6,1 km/par km² en haut des pentes. Ces mesures ont pu être effectuées sur des parcelles similaires situées à l'amont de toutes constructions et activités forestières.

Suite à la construction de la route forestière et suite aux travaux d'entretien forestier, la densité du DRAINAGE NATUREL (incluant les ravines et les torrents) est passé de 5,4 km à 14,4 km/km².

L'inventaire des allongements des lits d'écoulement a permis de constater une augmentation du drainage de 71 % sur l'ensemble du bassin versant.

Une description sur carte (figure 42) précise le travail effectué par le ruissellement avec la création de nouvelles ravines (Gully) et le travail effectué par les eaux sur les torrents existants incluant leurs élargissements et l'érosion des rives (guillied stream channel).

Les mesures des EVOLUTIONS des profils des ravines et torrents naturels ont été menées, après chaque orage (1980-1986), ainsi que le calcul des dépôts de sédiments à l'aval en partie basse du bassin versant, dont le cubage a pu être mesuré à l'aide de plots de repères.

(1) i.e. : initial establishment - les données d'origine

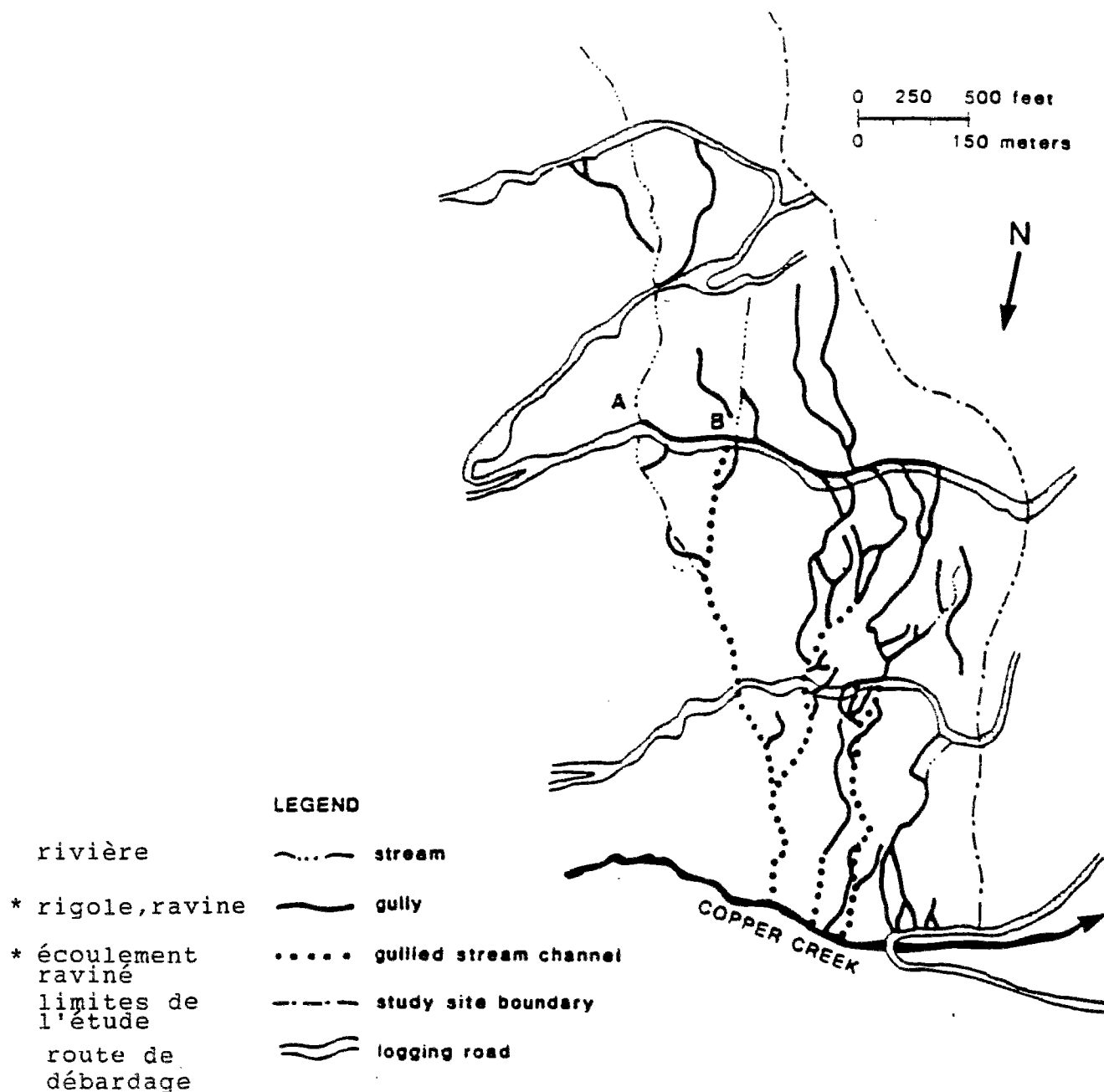


Figure 42 : Les effets du ruissellement suite à la construction d'une route forestière * *
(extrait de D. HAGANS, N. WEAVER, M. MADEJ [110])

Pour le RAVINEMENT, il a été décelé 5 origines :

- 1- le ruissellement de la route,
- 2- le ruissellement dans les sentiers des travaux forestiers,
- 3- les dérivations de ruissellement suivant les traces d'engins forestiers,
- 4- les passages des eaux sous la chaussée par buse,
- 5- les passages des eaux de ruissellement, sur la chaussée, sans busage, ni ponceau.

Ces cinq causes de ravinement par ruissellement sont associées à l'augmentation du drainage naturel collinaire. Elles sont dues à la présence d'activités humaines.

Cette recherche a formulé d'autres constats que nous indiquons ci-après :

La détérioration de la chaussée est plus importante dans le milieu et le haut du bassin ; par contre, 70 % des croisements eau/chaussée ont résisté dans la partie basse du bassin, construits avec un plus haut potentiel de possibilité de dérivation (déversoir d'orages) prévoyant des crues fortes.

Les détériorations dues aux eaux de ruissellement se trouvent être, de préférence, à la sortie de la buse sous-dimensionnée, dans le talus routier opposé d'aval, avec une érosion régressive, grâce aussi à l'effet des eaux de surface de la chaussée, qui "sortent" de la route au niveau des virages (figure 43a).

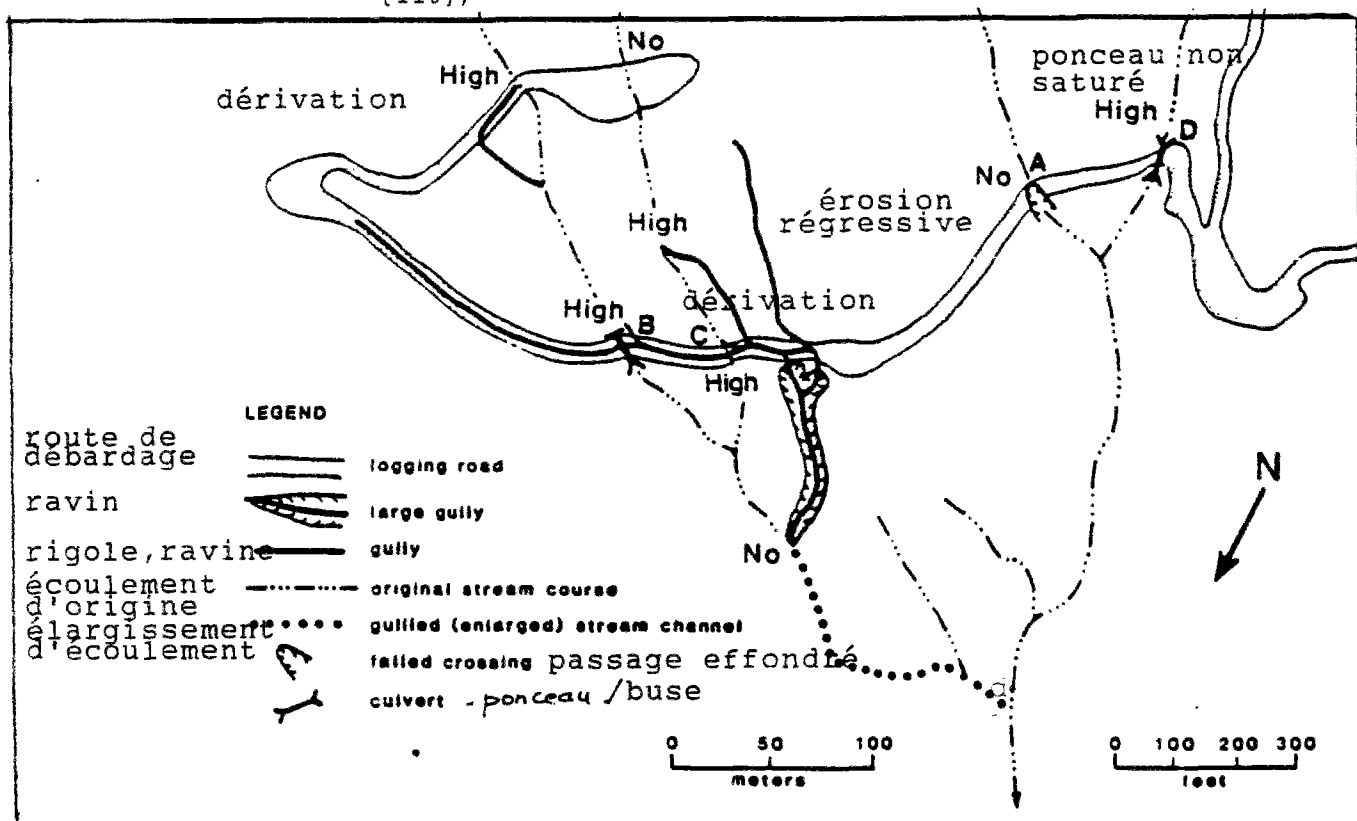
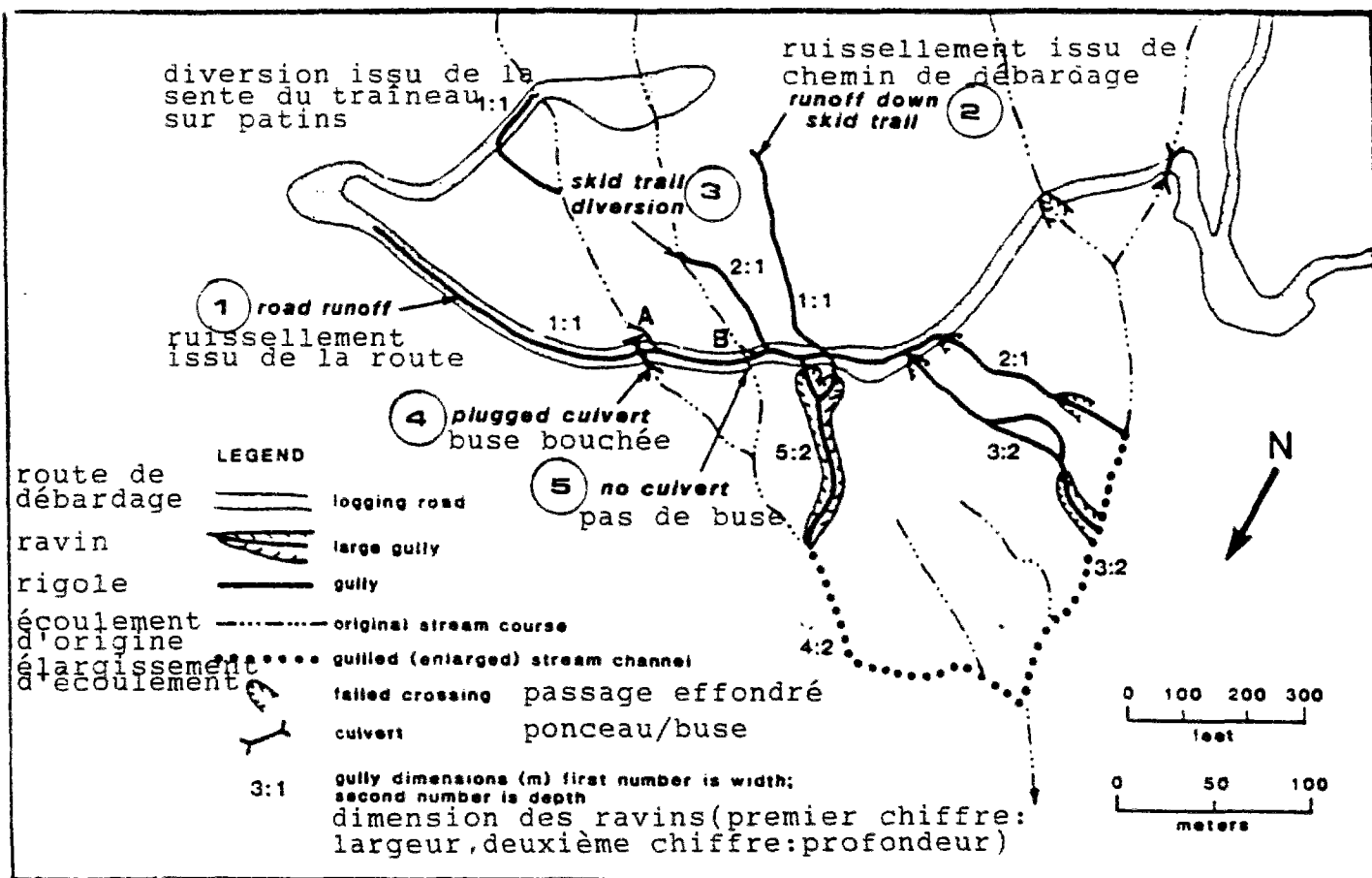
L'érosion à long terme issue du ruissellement n'a aucun motif de s'interrompre. Les résultats persistent dans les formes créées par l'eau. Il faut donc trouver des solutions efficaces et le plus rapidement possible.

La DETERIORATION au droit des passages de la chaussée par les eaux des versants existe si aucune possibilité de dérivation (ou d'exutoire) n'a été prévue pour le passage des eaux (situation "NO").

Si une situation de diversion des écoulements existe (situation "Hight" de haut niveau), il n'y aura ni détérioration sur place, ni dépôts de sédiments en aval (figure 43b).

Cette recherche nous a intéressés pour deux motifs : en premier lieu, le volume des eaux ruisselées et leur impact a été calculé de façon aussi précise qu'une modélisation.

Ensuite, les ouvrages de corrections proposées sur le site par l'étude ont montré leur potentialité à MAITRISER les phénomènes de ruissellement d'érosion et de sédimentation, quelle que soit la force des orages.



Nous citerons comme exemple de méthode naturaliste, les expériences de **VIOLLET-LE-DUC** [191] pour la réalisation de sa carte du Massif du Mont-Blanc (1868-1879) à l'aide d'un téléiconographe⁽¹⁾.

Au cours de l'élaboration de la carte, VIOLLET-LE-DUC découvrit le processus des retraits de glaciers. La méthode peut se résumer ainsi :

- Observations de terrain multidisciplinaires
- Descriptions des observations par dessins : croquis à grande échelle et échelle de détails
- Simulation des phénomènes (par élévation et planimétrie)
- Vérification sur les lieux des hypothèses
- Pronostics

Les travaux morphologiques de Viollet-le-Duc allient l'observation de terrain et la simulation d'un phénomène. Cette méthode lui permit de démontrer, en cherchant dans le chaos apparent du paysage, un ordre sous-jacent ; il découvrit le problème de la plasticité des glaces, la pluralité des invasions glaciaires en Savoie et Suisse combattue par de nombreux chercheurs, le phénomène de la glaciation, du recul en saut de puce des fronts de stationnement provisoire, du retrait avec les roches moutonnées et les différents dépôts morainiques, enfin la corrélation entre le volume des glaciers et la taille des moraines.

Ces théories sont confirmées par les recherches paléographiques actuelles et informatisées, soit un siècle plus tard (BLESO 1982 et DORTHE 1986).

Enfin, Viollet-le-Duc s'est appuyé sur l'état de la végétation sur les cordons morainiques pour donner l'époque d'abandon du cordon morainique (figure 44).

1.3.7. LA PREVISION DU RUISSELLEMENT PAR LES METHODES DETERMINISTES ET LES MODELES HYDROLOGIQUES

Le problème de la transformation des pluies en débits et de sa modélisation a été une des principales préoccupations des hydrologues, pour la prévision des crues issue du ruissellement.

Alors, comment peut-on prévoir les crues et donc les risques ?

Nous allons faire un tour rapide des méthodes de calcul de prévisions de crues et des ouvrages, mais vu leur nombre, ce chapitre ne comportera qu'une analyse brève de l'évolution des méthodes, accompagnée d'un avis ... formulé par d'autres que nous.

⁽¹⁾Appareil de visée se composant d'une longue vue dont la plaque est armée d'un prisme



a- Etat des lieux , cordons morainiques



b- Reconstitution en 1868.

Figure 44- Une théorie au service de l'observation
Viollet-Le-Duc (191)

Une reconstitution de glaciers à partir de l'observation de terrain (corrélation entre le volume des glaciers et la taille des moraines, état de la végétation sur les cordons morainiques pour donner l'époque d'abandon du cordon morainique, le recul en saut de puce des fronts de stationnement provisoire....)

Au large éventail des modèles d'abord empiriques, probabilistes, puis déterministes, a succédé depuis une décennie les modèles mathématiques hydrologiques ou analogiques.

1.3.7.1. LES MODÈLES DÉTERMINISTES

Les modèles déterministes permettent d'établir les relations pluies-débits en fonction des caractéristiques des bassins versants : sol, pente, végétation et hydrographie ; ils sont très utilisés.

L'ORSTOM⁽¹⁾, à partir des études du Laboratoire d'Hydrologie de Montpellier (France) a mis au point une méthode simplifiée du modèle déterministe global, la méthode "RODIER et AUVRAY (1972)" pour étudier la genèse des crues à fréquence décennale.

Jean Claude **OLIVRY** (France), lors des Journées d'Hydrologie d'Octobre 1986 [155], a retracé l'évolution de ce modèle global.

La base du modèle est qu'une averse journalière de fréquence donnée génère une crue de même fréquence. Le modèle introduit un coefficient de pointe, pour le calcul maximum de la crue. La principale caractéristique de ce modèle est la catégorie relief, l'influence du facteur pente sur le régime du bassin et donc sur le ruissellement étant déterminante, alors que le facteur précipitation paraît paradoxalement pouvoir être négligé comme variable explicative des paramètres de la crue.

La méthode "Rodier-Auvray" propose une série d'abaques permettant de faire une estimation des différents termes.

Elle introduit le calcul du maximum de la crue avec le COEFFICIENT DE POINTE C_p rapport du débit maximum à trouver sur le débit moyen issu du quotient VR/TB. (végétation, relief et temps de base de la crue).

L'inconvénient de cette méthode, d'après J.C. OLIVRY tient dans ce coefficient très variable d'un bassin à l'autre.

(1) ORSTOM - Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer

Equation du modèle global

$$QD = Cp (KaPD \cdot KRD \cdot S/TB)$$

où KaPD est la lame moyenne précipitée décennale
KRD le coefficient de ruissellement décennal
S la superficie du bassin
TB le temps de base de la crue
Cp le coefficient de pointe de crue
QD le débit décennal.

La METHODE SIMPLIFIEE de l'hydrogramme TRIANGULAIRE de M.F. ROCHE (1963-1981) utilisée pour des bassins versants plus grands, fixe par définition $Cp = 2$.

Pour J.C. OLIVRY la détermination du maximum de crue est donc complètement biaisée.

• Les problèmes :

L'analyse déterministe des relations pluies-débits est souvent délicate, en fonction des caractéristiques du bassin versant - sol, pente, végétation, hydrographie - dont les paramètres sont rarement définis de manière simple.

Même l'utilisation de la méthode simplifiée de prédétermination des crues décennales de ruissellement doit être faite avec PRUDENCE affirme J.C. OLIVRY.

La détermination des caractéristiques "perméabilité" et "végétation" est à aborder avec une réelle CONNAISSANCE DU TERRAIN et une connaissance des événements antérieurs centennaux et de "façon moins arbitraire".

Pour **MM. J. ABELE, F. DEGARDIN**, du Service de la Navigation de Nancy et **J.F. ZUNSTEIN** de l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse [48], la définition du risque inondation, c'est-à-dire du risque de dépassement, ne dépend plus des lois classiques.

Les auteurs mettent l'accent sur la faiblesse des moyens de critique pour les méthodes couramment utilisées ; ils insistent sur les PRECAUTIONS D'UTILISATION qui leur semblent progressivement négligées, avec la vulgarisation de l'utilisation de ces méthodes et leur installation sur des "calculateurs" qui tendent à conforter leur fiabilité scientifique.

Pour **J.F. JATON** (Confédération Helvétique (EPFL)) 1982 [127] au large éventail des relations empiriques a succédé une foison de modèles mathématiques.

La profusion des moyens mis à la disposition des ingénieurs déconcerte dans la mesure où certains "outils" sont trop sophistiqués et difficilement exploitables.

Ce sentiment se trouve renforcé chez les ingénieurs qui ont à s'occuper d'études hydrologiques de petits bassins versants agricoles. Et la querelle à laquelle se livrent certains spécialistes quant au choix du type de modèle à adopter (probabiliste, déterministe) ne peut que créer un trouble définitif chez les non-spécialistes.

M. JATON retient un modèle déterministe, avec simplification, des paramètres limités aux phénomènes essentiels.

- Le ruissellement direct :

L'analyse de l'hydrogramme observé à l'exutoire (événement averse-crue) d'un bassin versant permet de déterminer la part du RUISSELLEMENT DIRECT et, par suite, la hauteur de la pluie nette P_n qui, par définition, est égale à la hauteur de la lame d'eau ruisselée.

La partie du corps de l'averse qui ENGENDRE le ruissellement est appelée pluie efficace P_e de durée t_e . La pluie nette est donc une fraction de la pluie efficace (figure 45).

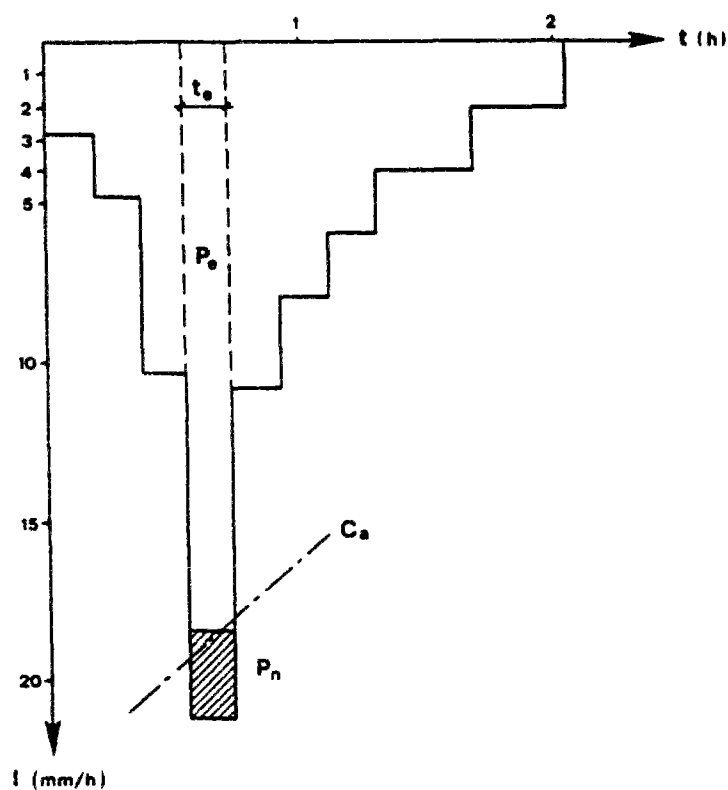


Figure 45 : Pluie nette, pluie efficace et capacité d'absorption (C_a).
Hyétogramme de l'averse du 26.9.75 à Ferlens (VD).
(extrait de la thèse de J.F. JATON "Contribution à l'étude des relations pluies-débits dans les petits bassins-versants ruraux" [127])

Dans le bilan hydrologique d'un bassin versant, les précipitations, c'est-à-dire la pluie brute, se répartissent en interception, rétention de surface, infiltration et ruissellement direct (figure 46).

Le volume du ruissellement direct, ou si l'on s'exprime en hauteur d'eau, la lame ruisselée est équivalente à la pluie nette.

On peut donc écrire : $P_n = P_b - L_p$

avec P_n = pluie nette

P_b = pluie brute

L_p = pertes

Les pertes se décomposant comme suit :

$L_p = I + S + F + EV$

avec I = interception

S = stockage dans les dépressions de surface

F = infiltration

EV = évaporation

• La méthode du coefficient de ruissellement :

La notion de coefficient de ruissellement recouvre DIFFERENTES DEFINITIONS. Nous nous intéressons ici au coefficient de ruissellement défini comme le rapport de la hauteur d'eau ruisselée (L_r) à la hauteur d'eau précipitée (P_b) au cours d'un événement "averse - crue".

$$C = \frac{L_r}{P_b} = \frac{P_n}{P_b}$$

Si l'emploi du coefficient de ruissellement est aussi répandu - par la méthode dite rationnelle - il le doit à sa grande simplicité de calcul.

Pourtant le coefficient de ruissellement (C_r) est généralement considéré CONSTANT dans le temps. Sa valeur est choisie compte tenu de la nature du bassin versant, en particulier de la couverture et du type de sol.

Des TABLES donnent les valeurs du coefficient C_r constant à introduire dans des formules de type rationnel, généralement utilisées pour la prédétermination des débits de pointe dans des bassins versants semi-urbains, voire dans les petits bassins versants agricoles.

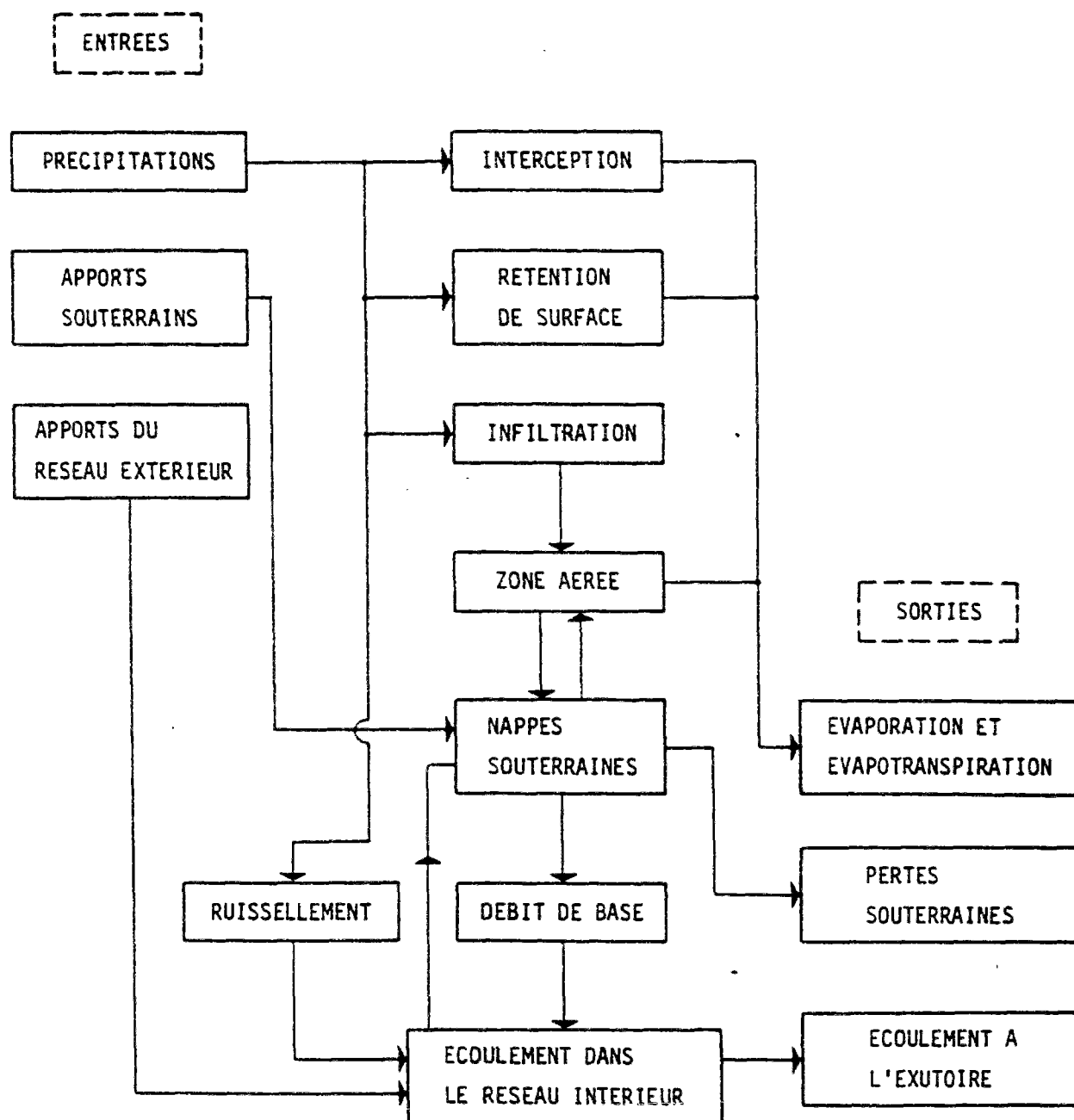


Figure 46 : Bilan hydrologique d'un élément de bassin versant [127]
extrait de la thèse de J.F.JATON

Mais L'ADOPTION D'UN COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT CONSTANT dans le temps n'est pas une solution satisfaisante lorsque l'on considère une SERIE D'EVENEMENTS "averse-crue" suivis affirme J.F. JATON.

- Un coefficient de ruissellement variable peut être introduit.
- Le coefficient de ruissellement peut être conditionné par l'humidité du sol. La fonction de production du modèle de ruissellement PREVIK (SOGREAH, 1966) procède de cette façon.
- La méthode du Soil Conservation Service (USA) pour la détermination du coefficient de ruissellement postule l'existence d'une relation entre la hauteur de la pluie P et la hauteur du ruissellement R.
- Le coefficient de ruissellement :

Une expérimentation sur la valeur du coefficient de ruissellement a été faite par le Laboratoire Physique "Pierre BIROT" du CNRS, et par deux divisions du GEMAGREF, la Division Qualité des Eaux de St Mandé et la Division Hydrologie d'Antony [74].

Selon C. COSANDEY, J.J. GRIL, F. JARRY, T. MUXART, et M. NORMAND [74], les expérimentations sur la Montagne du LINGAS, au Sud des Cévennes (1986) avec des simulateurs de pluie installées in situ, ont donné les résultats suivants (figure 47).

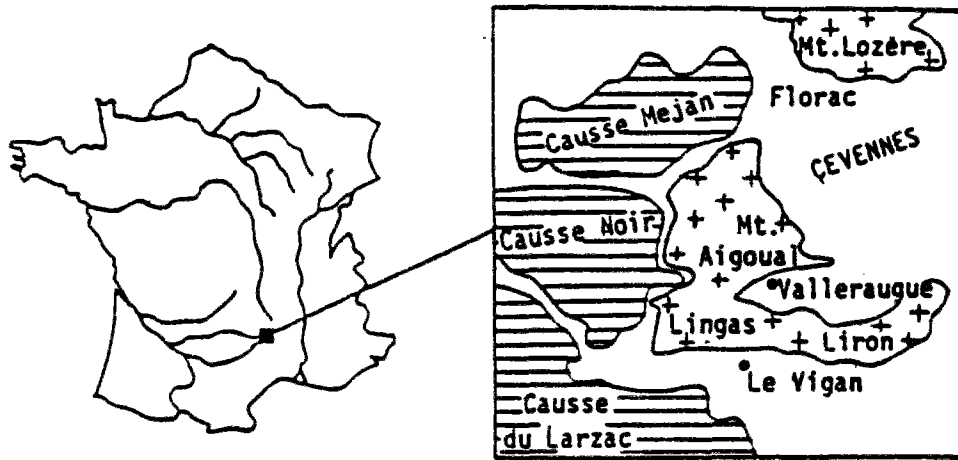
Il apparaît que la répartition des INTENSITES au cours d'un épisode pluvieux importe plus pour expliquer la valeur résultante du ruissellement que l'intensité moyenne ou même l'intensité maximale de la précipitation.

1. Les premiers résultats obtenus par C. COSANDEY (1986) ont montré que la pente comme l'humidité du sol ne jouaient pas un rôle prépondérant dans le DECLenchement du ruissellement de surface.

En revanche, l'intensité de la précipitation apparaît comme un facteur essentiel, qu'il s'agisse de l'intensité de la précipitation elle-même ou de l'intensité maximale subie par le sol AVANT l'événement pluviométrique considéré.

L'expérience a montré que, lorsqu'on produit sur une même parcelle deux averses de même intensité séparées par une phase d'intensité plus forte, la valeur du COEFFICIENT DE RUISELLEMENT AUGMENTE après la phase de forte intensité (figure 48).

Le coefficient de ruissellement, pour une pluie de l'ordre de 60 mm/h est de 11 % lors de la première phase de simulation. Après 2 h 30 de précipitation à 120 mm/h et un ressuyage de 24 heures, le coefficient de ruissellement pour une pluie d'intensité identique à celle de départ (soit 60 mm/h) se stabilise autour de 31 % (figure 48).



-Situation du Massif du Lingas

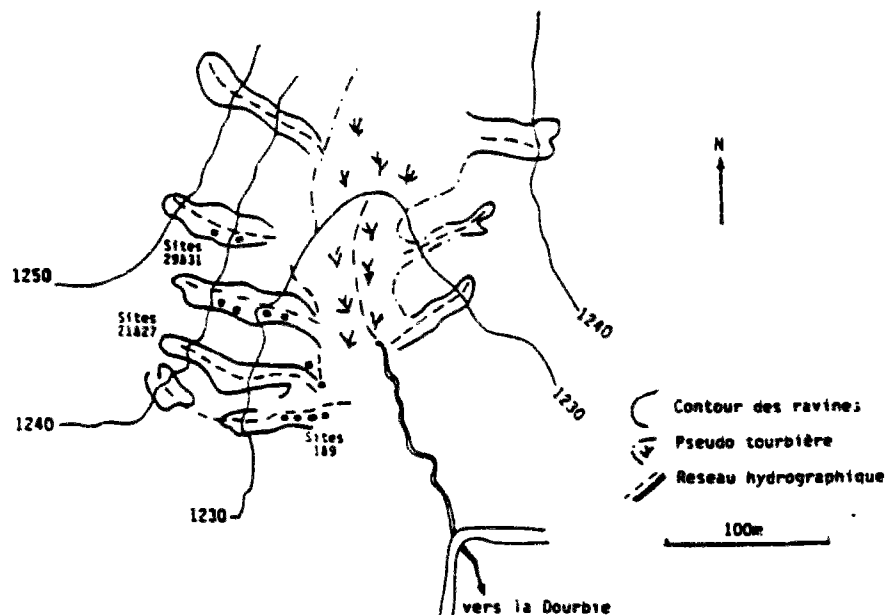


Figure 47 : Les sites de simulation de pluie [74]
(extrait de l'étude de C. COSANDEY, J.J. GRIL, F. JARRY, T. MUXART et M. NORMAND [74])

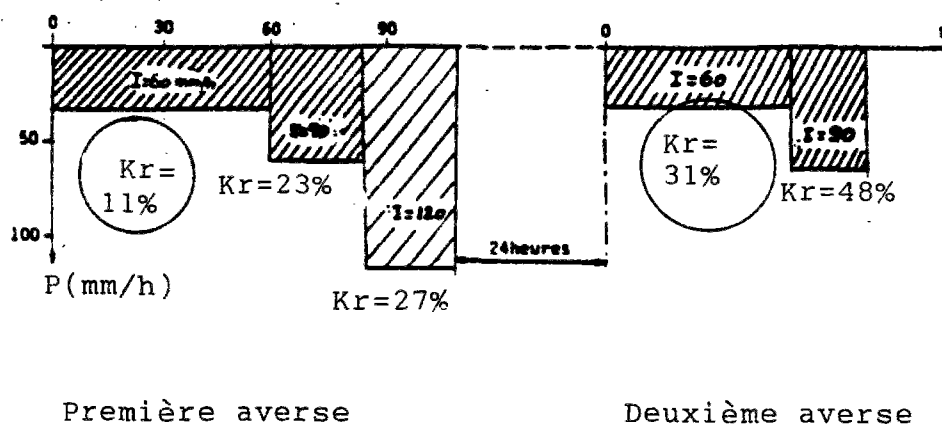


Figure 48 - Augmentation du Coefficient de Ruissellement (Kr) pour des pluies de même intensité ($I = 60 \text{ mm/h}$) après une pluie de forte intensité (120 mm/h).

Date de l'Exp.	Nom de l'essai	I de la pluie	I Maximum subie par la parcelle	Kr %
MAI 84	AG ₂	60	98	93
	AG ₂ ,bis	58	115	95
	AG ₃	61	61	62
	AG ₃ ,bis	48	117	73
	AG ₄	69	69	23
	AG ₄ ,bis	73	119	48
JUIN 85	AG _{2,3}	30	30	33
	AG _{2,4}	28	88	53
	AG _{2,6}	34	34	6
	AG _{2,7}	31	98	33
	AG _{2,9}	29	29	17
	AG _{2,1}	30	108	40

Figure 49 : Variabilité du coefficient de ruissellement après soumission de la parcelle à une précipitation de forte et de très forte intensité (étude C. COSANDEY [74]).

Selon **M. BOIFFIN** (1984) [56], cette augmentation de coefficient serait la conséquence d'une modification de l'état de surface, elle-même provoquée d'une part par la redistribution des particules déplacées par l'énergie des gouttes d'eau et d'autre part par la formation à la surface du sol de MICRO-FLAQUES d'eau contribuant à la destruction des agrégats.

Les conclusions des expérimentations de l'équipe de C. COSANDEY ont été que la valeur du coefficient de ruissellement dépend non seulement de la PRECIPITATION GENERATRICE mais de la PLACE de cette précipitation dans le déroulement de l'événement pluvieux.

Les valeurs globales du ruissellement, pour deux épisodes pluvieux présentant les mêmes caractéristiques, DIFFERENT donc selon la répartition des intensités au cours de l'événement pluvieux.

PLUS LES FORTES INTENSITES SE PRODUIRONT TOT, PLUS LE RUISSellement RESULTANT RISQUE D'ETRE IMPORTANT.

Ces expériences nous permettent de mieux comprendre l'événement survenu à Paris le 27 Juin 1990.

1.3.7.2. LES MODÈLES MATHÉMATIQUES HYDROLOGIQUES

Les modèles mathématiques hydrologiques sont nés avec l'avènement de l'informatique et le "boom" du micro-ordinateur. Ces modèles mathématiques, par rapport aux méthodes simplifiées, présentent l'avantage de générer des hydrogrammes d'une part et simuler des crues observées d'autre part.

Un certain nombre de modèles existent de part le monde. Nous citerons l'analyse de **M. CONSUEGRA** [68] (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Institut du Génie Rural) sur les différents avantages de ces modèles en fonction des objectifs. Certains modèles s'adaptent mieux à de petites surfaces, d'autres à de grandes surfaces, au ruissellement rural ou ruissellement urbain, à la dépollution ou au drainage.

Nous aborderons les modèles mathématiques utilisés en France (Département de la Seine-Saint-Denis) et en Suisse, dans le Canton de Vaud (Lausanne) dans les annexes 1 et 2.

Comme le souligne M. CONSUEGRA dans ses rapports pour les Journées d'Etude en Hydrologie de Surface (Juin 1987) à l'E.P.F.L., le modèle unique universel hydrologique n'existe pas. Le choix d'un modèle hydrologique dépend des conditions particulières du projet, du nombre de données à disposition et de l'expérience de l'ingénieur (figure 50).

Et **J.F. JATON**, actuellement responsable du Service Cantonal des Améliorations Foncières, rappelle que, pour les ingénieurs hydrologues qui ont à s'occuper de petits bassins versants à vocation agricole, les modèles mathématiques hydrologiques peuvent apparaître "démésurés" pour résoudre leurs problèmes. Et pourtant, ce sont ces modèles qui résoudront le mieux la gestion du ruissellement liée à la mise en valeur des ressources locales en eau (figure 51).

	Modeles							
Phénomène hydrologique	HYMO	SWMM	ILLUDAS	OTTHYMO	OTTSWMM	CEDRE	HYSTEM	URBIS
Simulation détaillée (petites surfaces)		*	*		*		*	
Simulation globale (grandes surfaces)	*			*		*		
Ruisselement rural	*			*		*		*
Ruisselement urbain		*	*	*	*	*	*	*
Laminage canal	*	*		*	*		*	*
Laminage conduite		*	*	*	*	*	*	*
Analyse surcharge		*			*	*	*	
Acheminement reservoir	*	*		*		*	*	simplifié
Double drainage				*	*			
Pollution		*						
Plans directeurs de drainage	*			*		*		*
Analyse détaillée		*	*		*		*	

: Comparaison de différents modèles en fonction de leurs aptitudes à simuler les divers phénomènes du cycle hydrologique

Figure 50 : Tableau établi par M. CONSUEGRA (EPFL) sur les différents modèles (C.H.) [68]

MODÈLE

model
modelo
Modell

Représentation concrète ou abstraite d'une réalité physique, économique, sociale ou autre, élaborée dans le but de simuler son fonctionnement, ou tout au moins son comportement, afin d'en tirer toute conséquence concernant l'estimation de ses paramètres, son évolution, les prévisions de son exploitation etc... En ce sens, par exemple, une loi de distribution statistique est un modèle.

MODÈLE GLOBAL

lumped model
modelo global
Blockmodell

Modèle basé sur l'hypothèse que le bassin réagit 'dans son ensemble' à l'événement climatologique; pour le mettre en oeuvre, on ne subdivise pas le bassin.

MODÈLE A DISCRÉTISATION SPATIALE

distributed model
modelo distribuido, modelo de discretizacion espacial
detailliertes Modell

Modèle mettant en oeuvre le découpage préalable du bassin dans le but de caractériser les différentes parties qui le composent. Le découpage est souvent arbitraire (par exemple en MAILLES carrées) et peut servir de support à une BANQUE DE DONNÉES physiographiques.

MODÈLE ANALOGIQUE

analog model
modelo analógico
Analogmodell

Modèle dans lequel on représente physiquement des propriétés mécaniques et des mouvements mécaniques (d'un fluide par exemple) par des propriétés électriques ou électroniques et des courants électriques régis par la même formulation mathématique. Par exemple, une propriété d'inertie peut être représentée par une self, un stockage par une capacité etc... Les modèles analogiques, notamment les modèles RC (résistance-capacité), ont été beaucoup utilisés en hydrologie souterraine.

MODÈLE CONCEPTUEL

conceptual model, deterministic model
modelo conceptual
Konzeptmodell

Modèle qui tâche de reproduire le mécanisme du système étudié. Le terme est plus restrictif que 'modèle déterministe' qui s'oppose à MODÈLE PROBABILISTE. On le préférera néanmoins pour des commodités de langage. Suivant la plus ou moins bonne représentativité du mécanisme, on peut parler de 'degré de conceptualité'.

MODÈLE DE BASSIN VERSANT

catchment model
modelo de cuenca
Einzugsgebietsmodell

Tout opérateur permettant de passer d'un épisode climatologique (événement ou chronique) se manifestant sur un bassin, à un épisode hydrologique (débits) qui en résulte à l'exutoire de ce bassin. Ce peut être une 'régression' (stochastique), une 'boîte noire' (d'allure déterministe mais à conceptualité très limitée), un modèle conceptuel.

MODÈLE A RÉSERVOIRS

storage model, tank model
modelo de tanques, modelo de depósitos
Speichermodell

Modèle de bassin dans lequel les différents éléments constitutifs du bassin, en surface et en souterrain, sont représentés par des réservoirs caractérisés par:

- un nom identifiant leur fonction
- une capacité nominale
- la ou les origines de son remplissage
- son ou ses modes de vidange comportant un ou des seuils et une ou des lois de vidange.

MODÈLE A RUISSELLEMENT

runoff model
modelo de escurrimiento
Abflussmodell

Basé sur une équation du bilan de surface: pluie-infiltration-ruisellement, ou sur une 'fonction de coefficient de ruissellement', ce type de modèle comporte toujours une 'fonction de production de la lame ruisselée', une fonction de 'mise en forme' qui n'est autre qu'un 'opérateur fonctionnel', et une 'fonction de transfert', les deux derniers étant généralement groupés dans une 'opération de convolution'.

MODÈLE DE PROPAGATION

routing model
modelo de propagación, modelo de tránsito
Wellenablaufmodell

Représentation mathématique de la propagation des débits, notamment des crues, dans un cours d'eau. Il existe deux catégories de modèles:

- basés sur les équations hydrodynamiques de l'écoulement (équations de Saint-Venant plus ou moins simplifiées);
- basés sur l'équation de continuité (storage routing); exemple: modèle de Muskingum.

Ces modèles sont largement utilisés pour la prévision des débits.

Figure 51 : Définition des modèles de base par J.F. JATON (C.H.) [128]

1.4 - LA PROTECTION CONTRE LE RUISSELLEMENT

Les travaux sur la protection vis-à-vis du risque du ruissellement a été abordée sous l'angle agricole, forestier et urbain, dans différents pays.

Nous avons choisi, là aussi, de retenir quelques livres qui nous sont apparus comme des ouvrages clefs pour notre mémoire et de les analyser. La liste bibliographique, en fin du document, complètera la liste des recherches.

La plupart des recherches sur la protection partent d'analyses de techniques ou d'aménagements existant sur le terrain. Seules les recherches de protection contre la pollution véhiculée par le ruissellement dépendent d'analyses de laboratoire.

1.4.1. L'ETAT DES RECHERCHES AU NIVEAU DE LA PROTECTION EN MILIEU AGRICOLE - U.S.A., R.F.A., France, Italie

1.4.1.1. U.S.A., modelé de sol, terrasses, diversions et chenaux enherbés.

Au niveau agricole, les premières études pour la maîtrise du ruissellement sont venues des U.S.A. (1935), face aux dégâts causés par le ruissellement sur les terres cultivées et l'érosion définitive de vastes étendues.

Le rapport de mission de Septembre 1987 de **J.J. GRIL et J. LAVABRE** [103] du Centre National du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et des Forêts traite de la maîtrise du ruissellement et de l'érosion aux U.S.A.

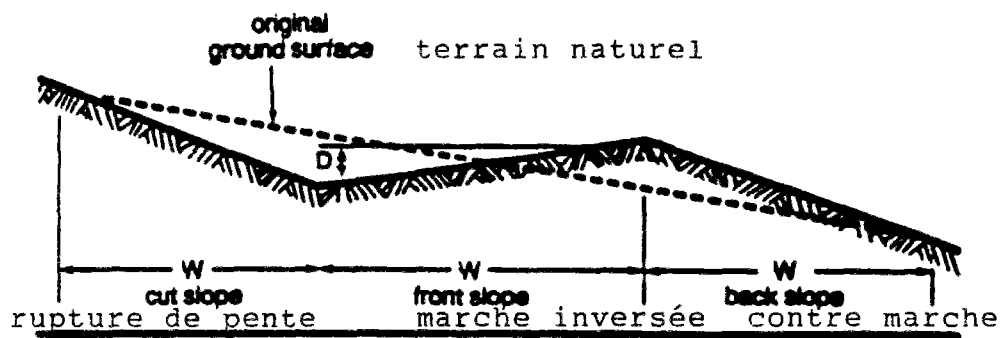
Dans le cadre de la collaboration entre le Soil Conservation Service (S.C.S.) et le Cemagref, les chercheurs français ont pu se rendre aux U.S.A. en 1986 pour voir les applications possibles de ces méthodes de maîtrise du ruissellement dans le contexte français, par des techniques physiques de diversion et de rétention des eaux.

• Maîtrise du ruissellement

1. **Aménagements** intraparcéllaires⁽¹⁾ et collecte des eaux en amont: les aménagements proposés par le S.C.S. commencent à la parcelle, avec des aménagements intraparcéllaires et la collecte des eaux en amont ; la protection mécanique est basée sur des plantations suivant les courbes de niveaux ("contourning") pour les terrains en pente, et sur le modelé du sol (sillons, billons) pour les terrains plus plats.

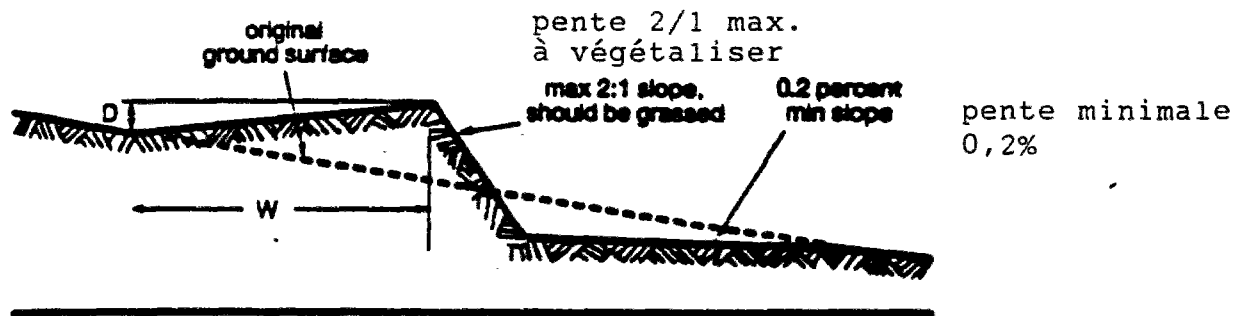
En pratique, ces techniques de rétention du ruissellement à la parcelle perdent leur efficacité pour des pentes supérieures à 7%.

(1) à l'intérieur des parcelles



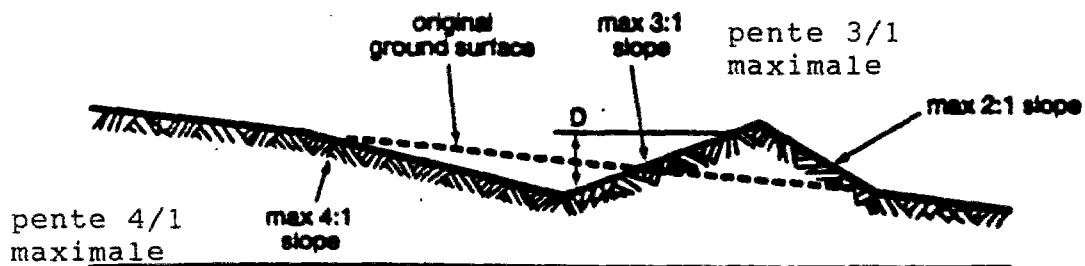
Broad-base terrace cross section

Section sur large banquette avec chenal à l'amont



Steep back-slope terrace cross section

section sur banquette avec marche à pente raide



Narrow-base terrace cross section

Banquette étroite à pente inversée

Figure 52 : Différentes sections de TERRASSES en terres ou BANQUETTES aux U.S.A. (brochure SCS) [103]

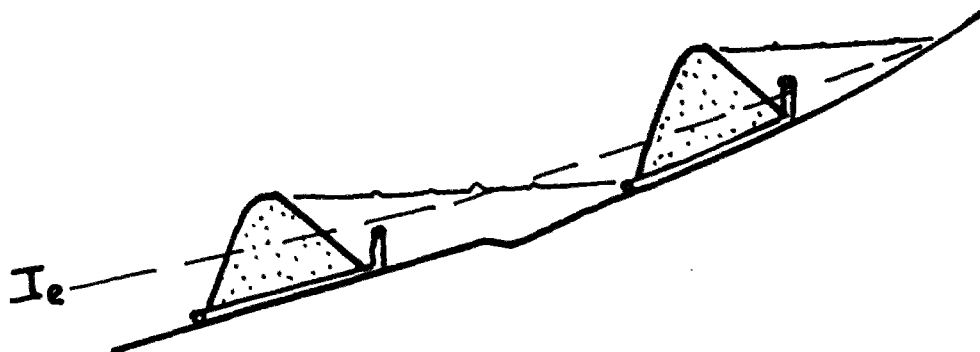


Figure 53 : Correction de ravine permanente par endiguement [103]
(extrait du rapport de mission de J.J. GRIL et J. LAVABRE [103])

2. Les chenaux enherbés

Les eaux de ruissellement sont évacuées par des chenaux enherbés (grassed waterway) et par des drains (tile outlet).

3. Les diversions

La technique des DIVERSIONS a remplacé celle des terrasses agricoles plus adaptées aux engins agricoles. Il s'agit de fossés agricoles destinés à protéger l'aval, en général l'habitation.

Les deux techniques - diversions et chenaux enherbés - sont utilisées dans le schéma général d'aménagement du bassin pour faire transiter l'eau en ralentissant les flots ou pour protéger un site habité (hameau, agglomération ...).

4. Les terrasses

Les terrasses étroites paraissent se développer. Elles permettent la maîtrise du ruissellement sur des pentes naturelles de 5 % à 10 %. Le versant aval des terrasses est enherbé (figure 52).

5. La correction des ravines

Cette technique rappelle celle de la Restauration des Terres de Montagne (RTM) en France. Une série de petites digues permet de stabiliser les plus grandes ravines (figure 53). La période de retour du projet est en général de 25 ans pour la correction des ravines.

6. Les bassins d'orage

Les bassins d'orage sont analogues dans leur fonction et dans leur conception aux aménagements réalisés en France, mais sont réalisés pour les aménagements agricoles aussi.

7. Les techniques culturales anti-érosives (conservation tillage) regroupent toutes les techniques de travail du sol (billonnage..) et les techniques de conservation de végétaux à la surface du sol ou de cultures intercalaires.

Le SCS⁽¹⁾, en termes de lutte contre le ruissellement, ne tient pas compte du rôle de la rugosité du sol et donc de la détention superficielle du sol.

8. L'hydraulique routière (U.S.A.)

L'aménagement des fossés bordant les axes routiers en fossés très larges, enherbés sont conçus pour le stockage de l'eau qui peut s'infiltrer sur place.

Pour les crues de fréquence rare, les pluies sont définies par la pluie maximale probable (P.M.P.). A titre d'exemple, la P.M.P. de 6 heures (pour 26 km²) varie de 350 mm à 800 mm entre le Nord et le Sud des U.S.A. Ce sont de toutes façons des valeurs bien plus élevées que celles retenues en France.

(1) Soil Conservation Service

	CN	Lame ruissellée (mm)	Coefficient de ruissellement
sans aménagement	86	21,3	0,43
avec terrasses	74	8,8	0,18

Précipitation : 50 mm
Culture: sarclée

Figure 54 : Coefficient de ruissellement sur terrasses.

Estimation faite par la méthode du CURVE NUMBER qui prend en compte les cultures et les aménagements anti-érosifs ainsi que l'aptitude des sols au ruissellement.
(extrait du rapport de mission de J.J. GRIL et J. LAVABRE [103])

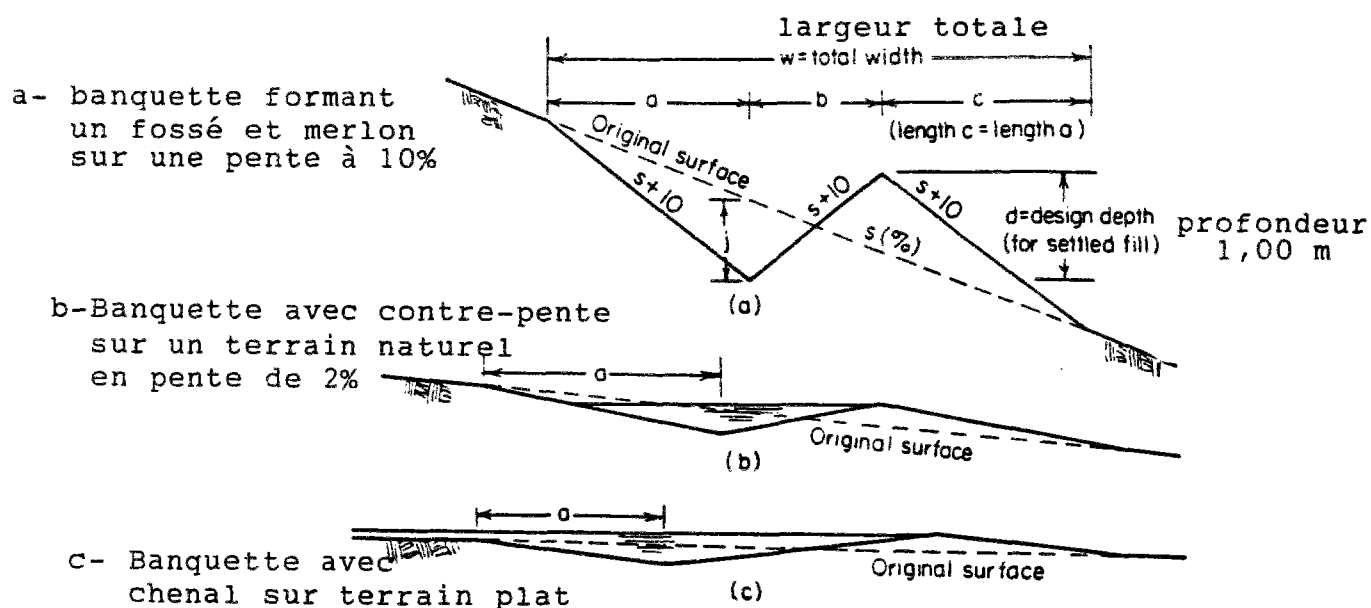


Figure 55 : Les techniques de diversion à l'amont [189]

(extrait du livre "Handbook of applied Hydrology [189] de Howard W. LULL
"Ecological and Silvicultural aspects")

En fonction des aménagements de rétention liés à la parcelle, les recherches du S.C.S. ont montré que, pour une précipitation de 50 mm :

- la lame ruisselée était de 21,3 mm dans une parcelle sans aménagement contre 8,8 mm dans une parcelle avec terrasses en terre,
- le coefficient de ruissellement variait de 0,43 sans aménagement à 0,18 pour la même parcelle avec le modelé du sol en terrasses (figure 54).

Pour le coût des dégâts causés par le ruissellement, le S.C.S. estime que le coût du ruissellement, phénomène extrêmement rapide, se mesure au coût du RETRAIT DES BOUES.

Les avantages des aménagements à la parcelle sont donc que le système des terrasses en terre et des chenaux enherbés protègent les bassins de rétention de l'envasement. Ces bassins de rétention retiennent les boues, évitent les dépôts en milieu urbanisé, le colmatage des réseaux de drainage urbain par obstruction des prises d'engouffrement et des avaloirs.

La principale difficulté, après l'information des intéressés, est la situation du foncier. Car la confection de réseaux enherbés d'écoulement du ruissellement implique souvent une refonte du parcellaire et, de toute façon, un coût collectif des travaux (figure 56).

Conclusion

La cohérence des aménagements de la conservation des sols et de l'eau aux U.S.A. permet une maîtrise du ruissellement, d'abord à l'échelle de la parcelle (comprenant la couverture végétale de la parcelle), puis à l'échelle du petit bassin versant et, enfin, à l'échelle du "grand" bassin versant.

Pour la France, dont le principal axe de lutte est le problème des dégâts causés aux collectivités, plus que la perte de sol, une cohérence d'aménagements comprenant les chenaux enherbés, les diversions et les terrasses en terre apporterait une modification dans les écoulements ainsi qu'une cohérence entre les aménagements de la parcelle et les aménagements du bassin versant.

L'ouvrage américain "HANDBOOK of APPLIED HYDROLOGY" de **VEN TE CHOW**, éditeur en chef (1964) [189] regroupe les techniques pour les ressources en eau (2 000 pages).

Il mentionne aussi, comme moyen de maîtriser le ruissellement, les terrasses en terre et les techniques de diversion à l'amont (figure 55).

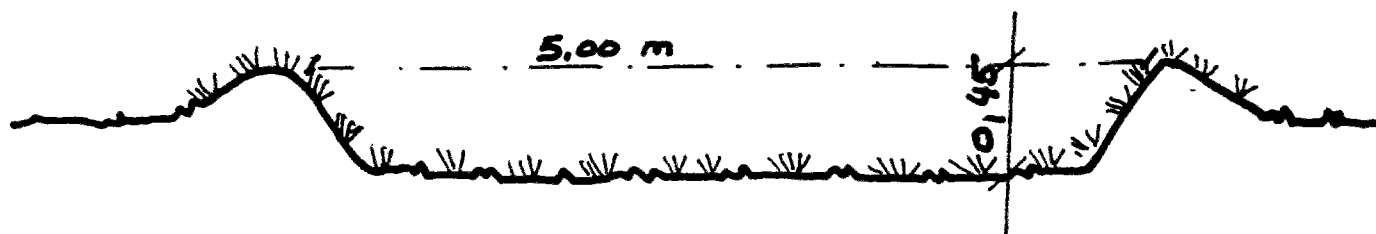
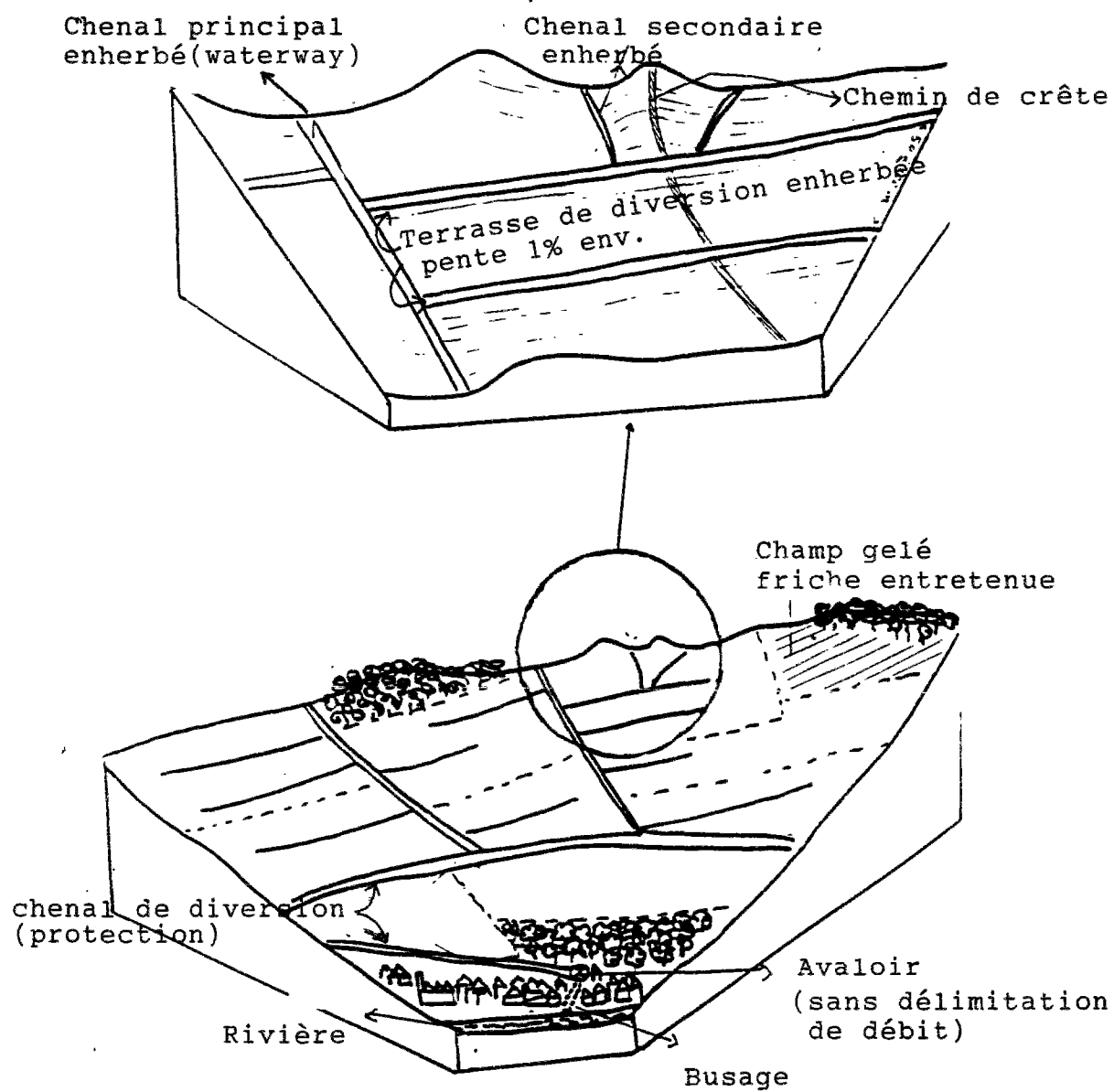


Figure 56 : Aménagements de diversions et chenaux enherbés [103]
(extrait de J.J.GRIL, J.LAVABRE, Rapport de mission aux U.S.A.)

1.4.1.2. R.F.A. Introduction de cultures dérobées⁽¹⁾
pour la protection contre le ruissellement en
milieu agricole.

Une étude pluridisciplinaire française a retenu notre attention [89]. **B. DUVOUX**, **J.J. GRIL**, du CEMAGREF (Division Qualité des Eaux, Pêche et Pisciculture), **C. LILIN** de l'Atelier Central de l'Environnement et **B. PAULET** de la D.E.R.F. du Ministère de l'Agriculture ont effectué une mission en 1986 en Bavière (R.F.A.) pour étudier comment était gérée la maîtrise de l'érosion sur les terres agricoles de la région.

La Bavière a mis sur pied des techniques nouvelles de lutte contre l'érosion, des techniques qui concernent donc la gestion du ruissellement, adaptées aux cultures à rotation (Maïs-céréales).

Mais en opposition aux techniques du S.C.S. des U.S.A. qui préconise, pour la lutte anti-érosive, des aménagements hydrauliques (fossés, terrasses en terre, banquettes, billons ...), les techniques anti-érosives appliquées en Bavière sont des techniques exclusivement CULTURALES.

La lutte contre l'érosion passe donc par la maîtrise du ruissellement et les techniques culturales que nous allons décrire permettent elles aussi de protéger le sol de l'érosivité des pluies et du transport des particules par le ruissellement.

Cette démarche "BIOLOGIQUE" a été provoquée par la préoccupation des agriculteurs d'obtenir une bonne maintenance des sols sur place - pour la portance, la stabilité structurale, l'activité biologique et les restitutions organiques.

Trois facteurs ont poussé à la mise en place de techniques culturales anti-érosives :

1- la lutte anti-érosive est explicite dans tous les documents des organismes agricoles qui dépendent du gouvernement du LAND de Bavière, avec la présence politique "des verts" ;

2- il y a en Bavière une densité élevée du nombre d'agriculteurs par hectare ;

3- les sols limoneux de la région sont peu épais, sur un substrat morainique très peu fertile.

• **Les techniques culturales anti-érosives**

Ces techniques comprennent trois volets, le travail du sol (mais sans "modelé" du sol), l'introduction des cultures dérobées, la mise en place de bandes fixes de végétaux anti-ruissellement.

⁽¹⁾ Culture dérobée : culture pratiquée dans l'intervalle de deux cultures principales et pour laquelle on utilise des plantes à court cycle de végétation

a- le travail du sol

La maîtrise du ruissellement passe par le travail du sol. Le sol est travaillé de telle façon (système HORSCH) qu'il devient poreux. Il y a, après orage, une bonne infiltration (infiltrabilité) et une faible dégradation de la surface.

Le système HORSCH est un travail REDUIT du sol permettant le recouvrement de la graine par mélange de la terre ameublie avec de la PAILLE;

La mission a pu constater la différence de comportement d'une parcelle travaillée conventionnellement et d'une parcelle travaillée avec la méthode HORSCH. Après un violent orage, la première parcelle avait une surface "glacée" et la seconde une surface poreuse.

b- Introduction de cultures dérobées

L'introduction de cultures DEROBEEES dans les techniques de semis où le sol demeure longtemps dénudé constitue des éléments d'une stratégie de REDUCTION du risque d'érosion pendant la plus grande partie de l'année.

Les cultures dérobées protègent le sol contre l'EROSIVITE de la pluie d'automne jusqu'au début de l'été ; cette protection est d'abord due à la diminution de l'impact des gouttes d'eau sur le sol. Elle empêche la repousse de mauvaises herbes par sa densité et son homogénéité, élément important dans la pollution du ruissellement par les HERBICIDES (simazine, atrazine ...) QUI NE SONT PLUS ALORS UTILISES.

• Le choix des cultures dérobées

Les principales cultures dérobées sont les suivantes (1) :

- la MOUTARDE convient pour un semis tardif (densité 25 kg/ha) (fleurs blanches)
- la PHALÉCIE (densité 14 kg/ha)
- le TREFLE d'ALEXANDRIE (tabar) semé à la dose de 30 kg/ha
- le COLZA d'ETE, qui est retenu plus pour les parcelles forestières que pour l'agriculture à cause de sa résistance et de la nécessité d'utiliser annuellement des herbicides (fleurs jaunes)
- la FÉVEROLE (VICIA FABIA) assure aussi une bonne protection du sol, mais favorise un envahissement par les mauvaises herbes, ce qui, dans certains cas de stabilisation rapide, n'est pas une mauvaise chose.

• La technique des cultures dérobées

Une plante inter-culture est donc introduite pour freiner l'impact du ruissellement par la présence d'une couverture végétale.

(1) Nous les citons de façon à répandre leur utilisation dans d'autres domaines (grand chantier - déblai, remblai ...)

En complément, la technique consiste à faire aussi une incorporation superficielle de la plante d'apport ; et sa masse végétale favorise la décomposition de matière organique, ce qui réduit aussi l'effet ANTI-EROSIF.

c- Mise en place de bandes de culture de PROTECTION (figure 57)

La mission a pu constater l'efficacité des bandes de culture intermédiaire de protection (lignes d'escourgeon dans une parcelle de maïs en déclivité). Dans la parcelle où les lignes de semis de maïs étaient parallèles aux courbes de niveaux, une bande de protection d'orge retenait la terre et formait de petites marches en escalier.

L'intérêt de ces bandes intercalaires paraît triple :

- la terre érodée en amont se dépose avant la sortie de la parcelle,
- il y a création de zone d'infiltration préférentielle et
- le ruissellement d'amont est dispersé.

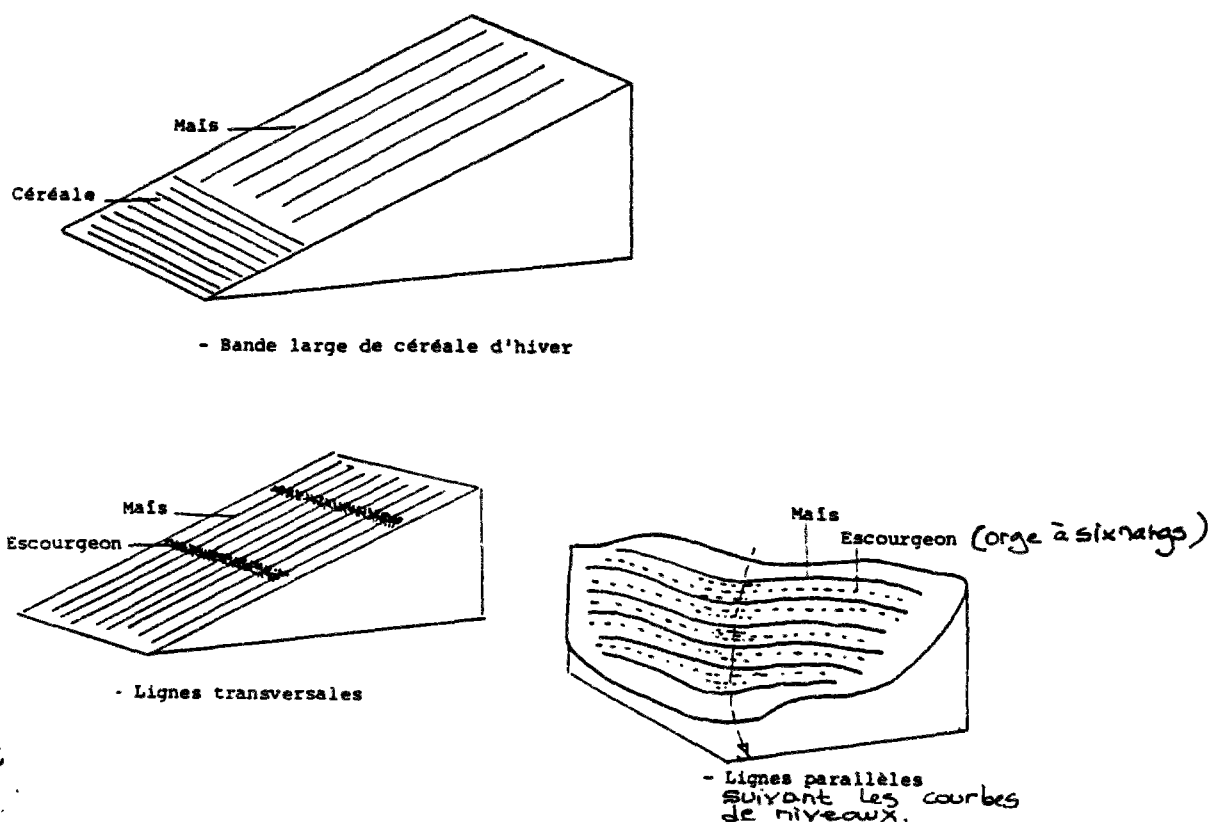


Figure 57 : Mise en place de bandes de cultures intercalaires anti-ruissellement et anti-érosion (extrait de l'étude de B. DUVOUX, J.J. GRIL, C. LILIN et B. PAULET [89]).

Ces pratiques agricoles, qui préconisent une couverture végétale totale ou des haies de protection parallèles à la pente, pourraient donc être appliquées dans d'autres secteurs (forestiers, infrastructures, zones semi-urbaines ...) pour la lutte contre le ruissellement dans les secteurs d'amont.

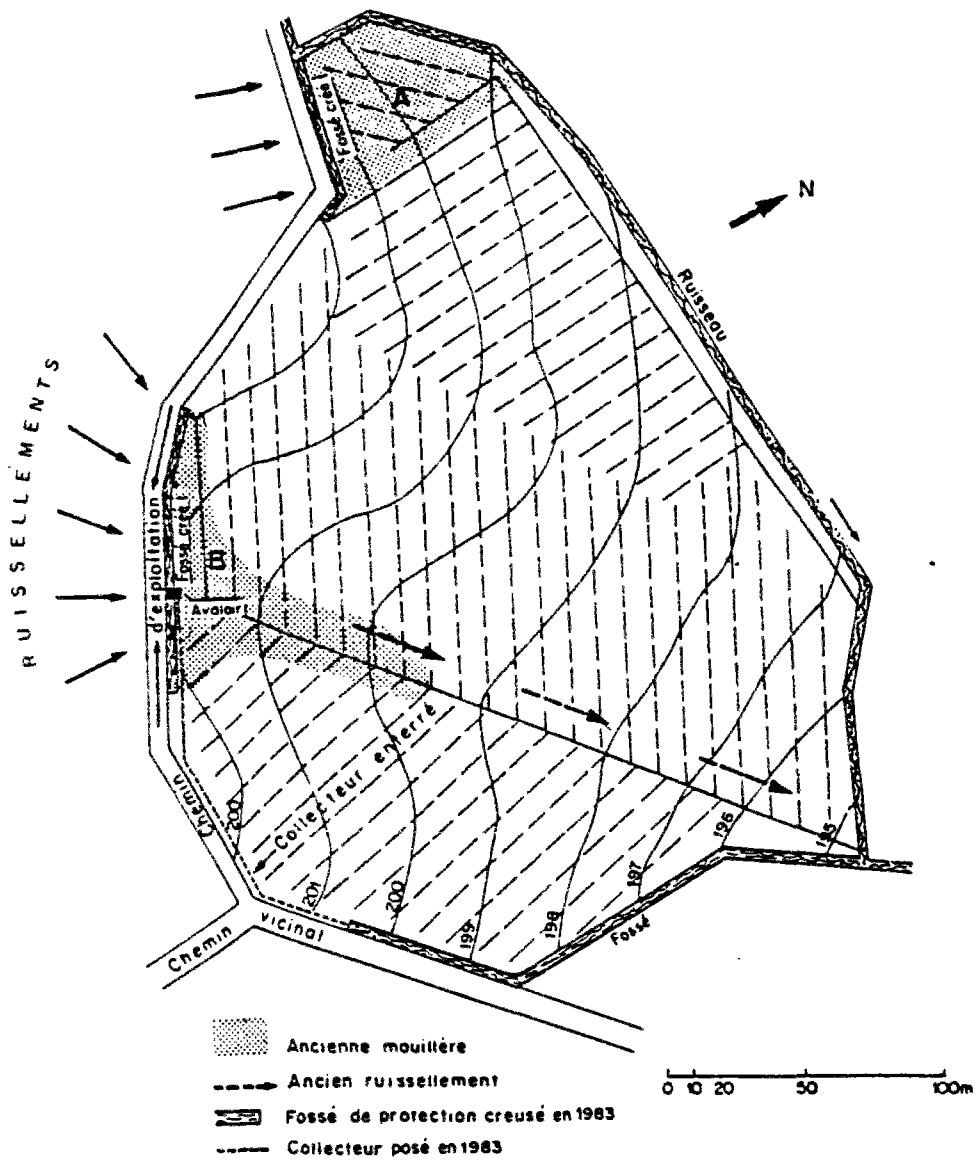


Figure 58 : Rétention du ruissellement d'amont
(extrait de B. TEILHARD de CHARDIN et J. VERON, INRA [184])

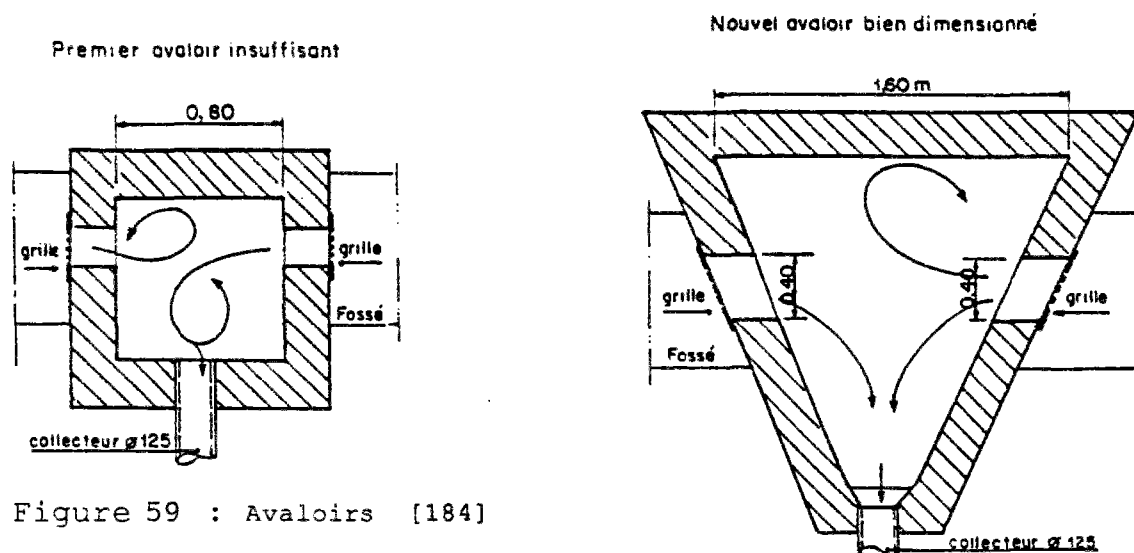


Figure 59 : Avaloirs [184]

1.4.1.3. FRANCE : les techniques de rétention⁽¹⁾ a l'amont au niveau agricole : fossés et assainissement

Parmi les techniques de prévention peuvent être incluses les techniques de rétention du ruissellement d'amont. Nous prenons le soin de les décrire car ces techniques, qui sont peu utilisées en France sinon en montagne, sont considérées comme mineures, par leur faible coût et leur faible occupation de l'espace, et donc considérées comme inefficaces ...

Pourtant ce sont des techniques qui, si elles ne contiennent pas la totalité des eaux d'un événement exceptionnel, peuvent du moins préserver de l'envasement, en aval, et des dépôts de boues, en milieu urbain et dans les habitations.

Nous prendrons comme exemple de techniques de rétention d'amont, la recherche qui a été effectuée par l'INRA, par **B. TEILHARD de CHARDIN et J. VERON** en 1984 [184].

Une maîtrise de l'excès d'eau de ruissellement peut être réalisée à l'aide d'une protection périphérique de parcelles par captage et fossés de ceinture.

Cette étude a été menée sur le domaine de l'INRA, à Mirecourt (Dijon) par le Département de Recherches sur les Systèmes Agraires et le Développement, pendant 2 ans.

Les hypothèses ont directement été testées sur le terrain et ont donné des réponses intéressantes.

a- L'expérimentation

- Description des parcelles : les parcelles sont des prairies permanentes exploitées en pâturage tournant. Le sol est argileux donc peu perméable et, de plus, subit le piétinement du bétail. La pente varie entre 12 % et 2,5 %.
- Les excès d'eau : les eaux excédentaires proviennent des pluies qui tombent directement sur le terrain et des ruissellements qui proviennent des parcelles d'amont.
- Protection périphérique : afin de "détourner" les eaux de ruissellement des parcelles d'amont (4 ha), un fossé profond de 70 cm a été creusé le long de la clôture, dirigé vers le ruisseau existant (figure 58).

Un premier avaloir de forme carrée de 0,80 m de côté a été construit mais trop petit ; et le débordement a eu lieu avec une pluie de 29 mm/jour dès la première année (figure 59).

⁽¹⁾ Techniques de rétention : action de retenir des eaux de pluies, en général avec la notion d'infiltration dans les pays anglo-saxons.
Techniques de détention : les bassins de détention participent à la rétention des refoulements par dérivation. Ils sont imperméables et assurent un stockage provisoire.

Il a donc été prévu de reconstruire l'avaloir de façon largement sur-dimensionnée (1,60 m de côté) et de forme prismatique à fond triangulaire, avec la sortie à un angle, de façon à orienter la circulation de l'eau, sans remous donc, pour favoriser l'accélération des eaux vers le collecteur (figure 59).

Autre constat, les rives du fossé se sont érodées le premier hiver, mais sans détérioration du fond du fossé. Il a suffi de stabiliser ce fossé à l'aide d'un ENHERBEMENT au ray-grass anglais pour stopper toute nouvelle érosion pendant les 3 années suivantes.

Sur une autre portion du fossé, où le fond du fossé a été raviné, le fossé a été approfondi de 50 cm, recalibré et rempli de galets de 25-60 mm.

Les chercheurs ont vérifié, 2 ans après, le bon fonctionnement de ce FOSSE DRAINANT, sans colmatage des galets, avec absorption des fortes pluies et sans aucune trace d'érosion.

b- Les méthodes agricoles hydrologiques de calcul

L'expérience menée par les ingénieurs de l'INRA est intéressante en ce sens qu'elle utilise pour le calcul des capacités des fossés et des canalisations d'évacuation des méthodes hydrologiques agricoles simples et efficaces. Les méthodes sont les suivantes :

- Avant d'élaborer le projet hydrologique, l'OBSERVATION des lieux est nécessaire pour localiser les ruissellements et estimer leurs débits, en été à l'occasion d'un gros orage, et en hiver lorsque le sol est saturé par une très forte pluie. Les auteurs recommandent "de visiter la parcelle au moment de l'année où les ruissellements sont les plus intenses et d'estimer à l'OEIL le volume des filets d'eau à leurs passages préférentiels".
- Une autre méthode pour mesurer les écoulements, et prévoir les réseaux de drainage enterrés, consiste à utiliser une PLANCHE découpée en équerre, et GRADUEE pour 100, 125, 160 et 200 mm. Cette planche est placée en travers du filet d'eau à évacuer qui a fait sa trace dans le sol ; la lecture directe de la graduation atteinte par l'eau donne le DIAMETRE du collecteur nécessaire pour évacuer avec une marge de sécurité de 20 % (figure 60).

c- Les modifications

Le ruissellement est modifié si le couvert végétal change et si les moindres micro-reliefs existants, comme une simple ornière, sont remaniés.

Ces modifications de surface de bassin versant peuvent "déjouer les prévisions les plus sophistiquées" confirment les auteurs de la recherche.

Ils rappellent que le réseau de collecte des eaux de ruissellement d'amont doit être indépendant du réseau de drainage systématique de la parcelle, afin de limiter les risques d'ensablement et les risques d'éclatement de la conduite à l'occasion d'une mise en charge en période de crue (figure 61)

Le coût de l'isolement hydraulique d'une parcelle correspond à la moitié environ du coût d'un drainage systématique de la parcelle, mis en place pour un motif autre de meilleur rendement agricole, même s'il s'agit d'un pâturage.

Planche graduée pour choisir le diamètre d'un collecteur

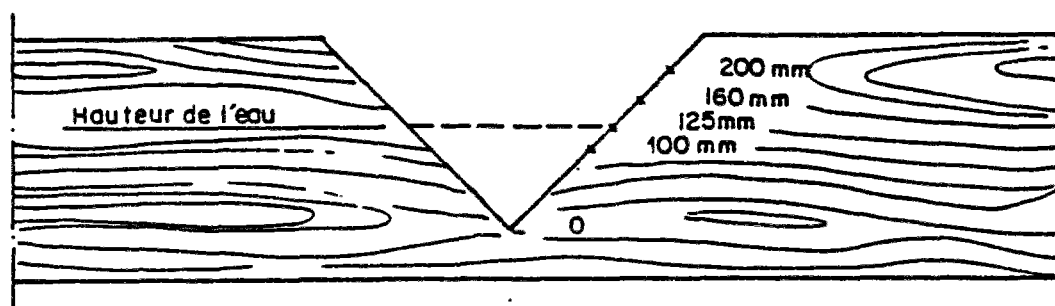


Figure 60 : Méthode agricole pour l'estimation du diamètre d'un collecteur (extrait de B. TEILHARD de CHARDIN et J. VERON, INRA [184])

Coupe du tracé d'un collecteur d'évacuation des eaux d'un fossé de protection périphérique

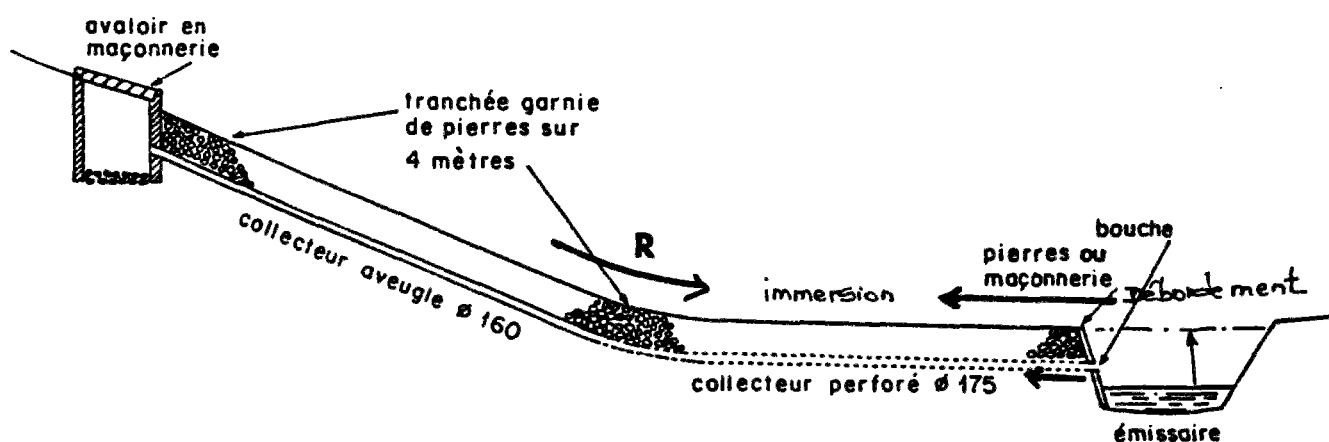
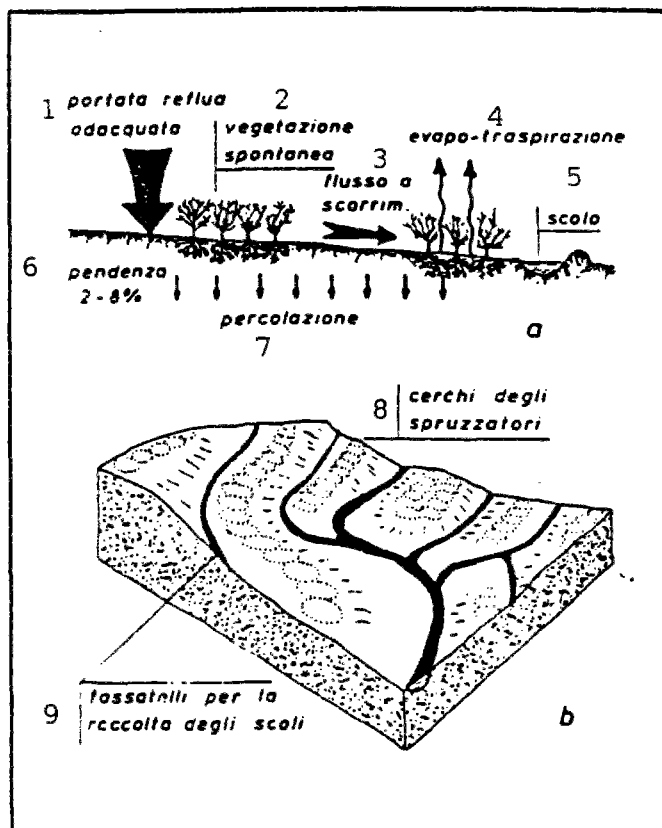


Figure 61 : Le collecteur perforé de Ø 175, en cas de crue, se met en charge et inonde la zone plate jusqu'à la rupture de pente, pour protéger le réseau (extrait de B. TEILHARD de CHARDIN et J. VERON, INRA [184])



- 1-Totalité des apports d'eau
- 2-végétation spontanée
- 3-ruissellement
flux d'écoulement de surface
- 4-évapotranspiration
- 5-dépression
- 6-pente comprise entre 2% et 8%
- 7-percolation
- 8-recherche des évaporateurs
- 9-fossé pour la récolte des sédiments

Figure 62 : Ruissellement direct et écoulement piégé
(extrait de R. NAPOLI (Italie [151]))

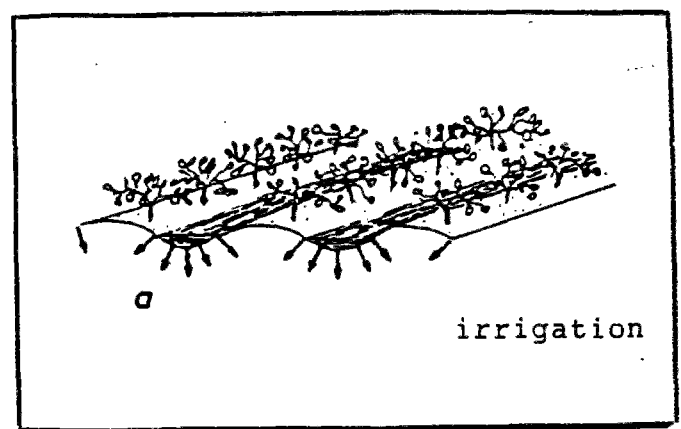
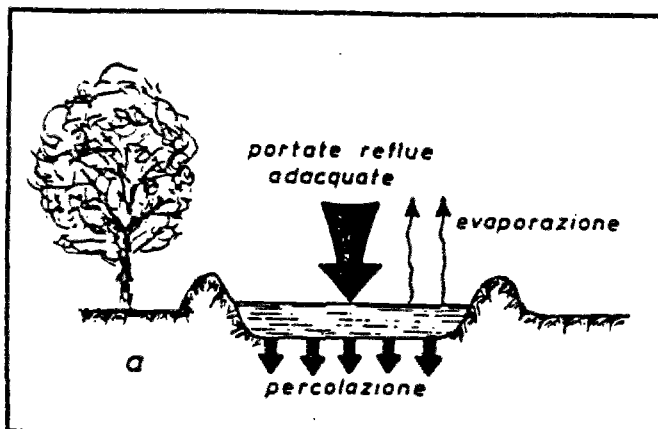


Figure 63 : Ruissellement et infiltration
(extrait des études de R. NAPOLI (Italie) [151])

1.4.1.4. ITALIE : irrigation et ruissellement direct

En Italie, le Centre "Dipartimento di difesa del suolo" de l'Université de Calabre, a mis au point les techniques T.D.I. (technique de purative irrigue) en reprenant les principes de l'irrigation par ruissellement direct.

Nous sommes loin évidemment du ruissellement à risque majeur, mais nous abordons quelques techniques de rétention d'amont, qu'il est nécessaire de connaître dans l'objectif de la maîtrise du ruissellement.

Le travail de Rodolfo **M.A. NAPOLI** [151] sur l'utilisation du ruissellement en agriculture repose sur deux principes :

1er principe : les eaux de pluie doivent ruisseler et irriguer suivant un tracé déterminé par les courbes de niveaux (figure 62) ;

2ème principe : le ruissellement doit pouvoir s'infiltrer dans les secteurs de production, par la rétention du sol modelé et par le travail des plantes, de façon à dépolluer (figure 63).

Nous reprendrons dans un chapitre à part le travail de recherche fait en France sur la dépollution des eaux de ruissellement par des techniques naturelles d'infiltration ou de lagunage.

1.4.2. LES DEFENSES CONTRE LE RUISELLEMENT D'AMONT : PETITS BARRAGES ET RETENUES COLLINAIRES

Les études de la maîtrise du ruissellement d'amont conduisent à des techniques micro-hydrologiques.

Nous abordons les techniques de rétention liées aux petits barrages, aux barrages collinaires de rétention ou retenues collinaires qui permettent des champs d'inondation.

Pour le laminage des crues de petits bassins versants, il existe différentes techniques de retenues qui vont de la mare aux petits barrages successifs sur les écoulements préférentiels.

1.4.2.1. LES PETITS BARRAGES

Ces ouvrages qui à l'origine étaient construits comme réserves d'eau pour l'irrigation, se retrouvent de plus en plus servir de barrage de régulation du ruissellement.

Les techniques de barrages en Aménagement rural (Ministère de l'Agriculture - 1977) ont leur histoire. Il semblerait que 25 % environ des ruptures soient causées par leur submersion et toute submersion d'un barrage en TERRE, liée à l'apport du ruissellement donc, entraîne rapidement sa destruction ; la prévision des volumes de ruissellement et le dimensionnement des évacuateurs de crues sont donc deux données à calculer de façon précise.

De nouveau, nous retombons sur les difficultés de calcul pour déterminer les crues d'entrée du bassin et le rôle joué par celui-ci, c'est-à-dire le laminage de la crue.

• L'estimation de crue des petits barrages

Selon une recherche parmi d'autres, faite à l'Ecole Nationale des Ingénieurs de Travaux Ruraux et des Techniques Sanitaires de Strasbourg (1986) [MBENGUE 142], l'estimation de la crue de projet repose sur les données de base qui sont le coefficient de ruissellement, les lignes isochromes* et le temps de concentration, le choix des fréquences des crues, la dispersion spatiale des pluies et l'extrapolation de l'estimation des crues pour des fréquences très rares.

		Pourcentage de surface boisée			
		0%	20%	50%	
Nature du sol	Imperméable	1,0	0,8	0,7	0,5
	plutôt imperméable	0,8	0,6	0,5	0,3
	plutôt perméable	0,6	0,4	0,3	0,1
	Perméable	0,3	0,2	0,1	0,05

Figure 64 : Coefficient de ruissellement (thèse de MBENGUE I. 1988 [142])
Tableau donnant les ordres de grandeur de K_r dans les conditions d'une crue décennale (à utiliser avec une extrême prudence dit l'auteur)

Manifestement, le coefficient de ruissellement devrait varier avec le temps, l'intensité de la pluie, la nature du sol, et son état d'humidité initial. Mais, faute de mieux, on prend une VALEUR CONSTANTE pour ce coefficient de ruissellement, pour un type de sol et de couverture végétale et pour une averse donnée (figure 64).

• Petits barrages et crues exceptionnelles

De façon générale, les barrages de rétention ne menacent pas la sécurité publique et ne présentent pas un danger réel.

Par contre, ils n'apportent jamais une garantie totale, ils peuvent être submergés, contournés ou endommagés.

* Une ligne isochrome est un lieu géométrique de points pour lesquels la pluie tombée arrive après un même intervalle de temps à l'exutoire.

Nous indiquons une série de possibilités de conception de petits barrages, allant des simples portes aux barrages en gabions pour arriver aux petits barrages en terre (figures 65 à 70) (article de R.J. COURTAUD [72]).

Plusieurs problèmes existent pour ces types de barrages : leur destruction et leur envasement. Par contre, malgré leur petitesse, ils peuvent fournir des activités diverses qui peuvent se compléter.

Figure 65 :

Barrage voile en béton armé
(extrait de
R.J. COURTAUD
"Choix et conceptions
de petits barrages pour
le Burkina FASO [72])

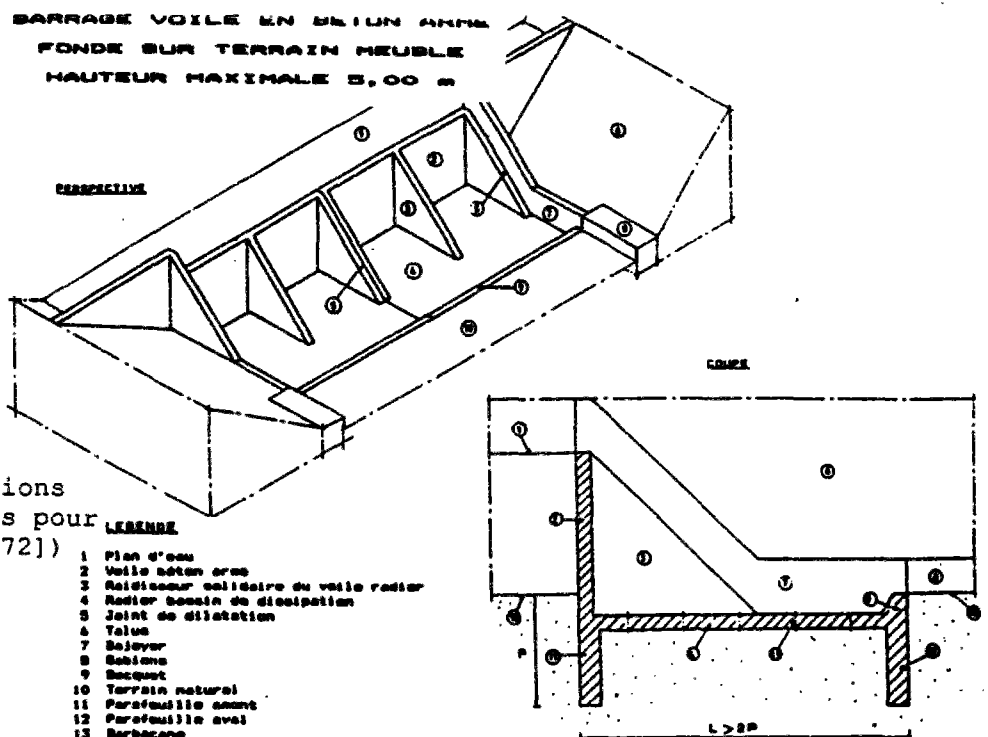
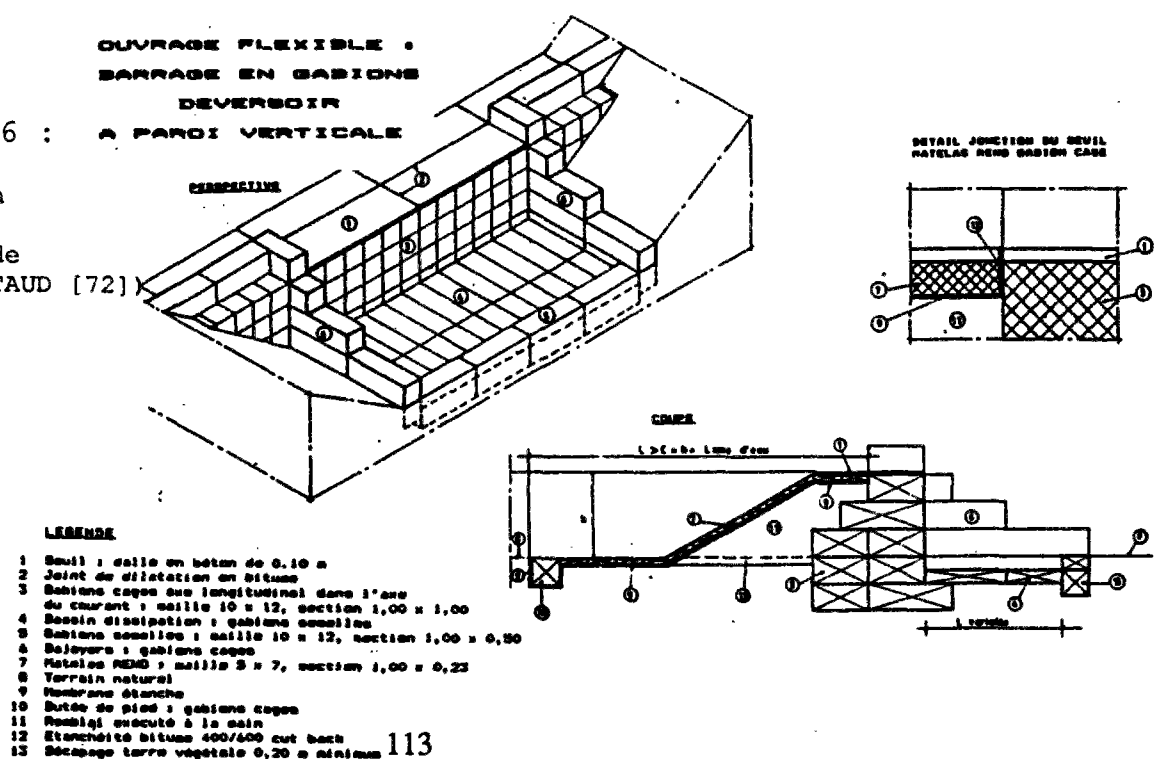


Figure 66 :

Barrage en
gabions
(extrait de
R.J. COURTAUD [72])



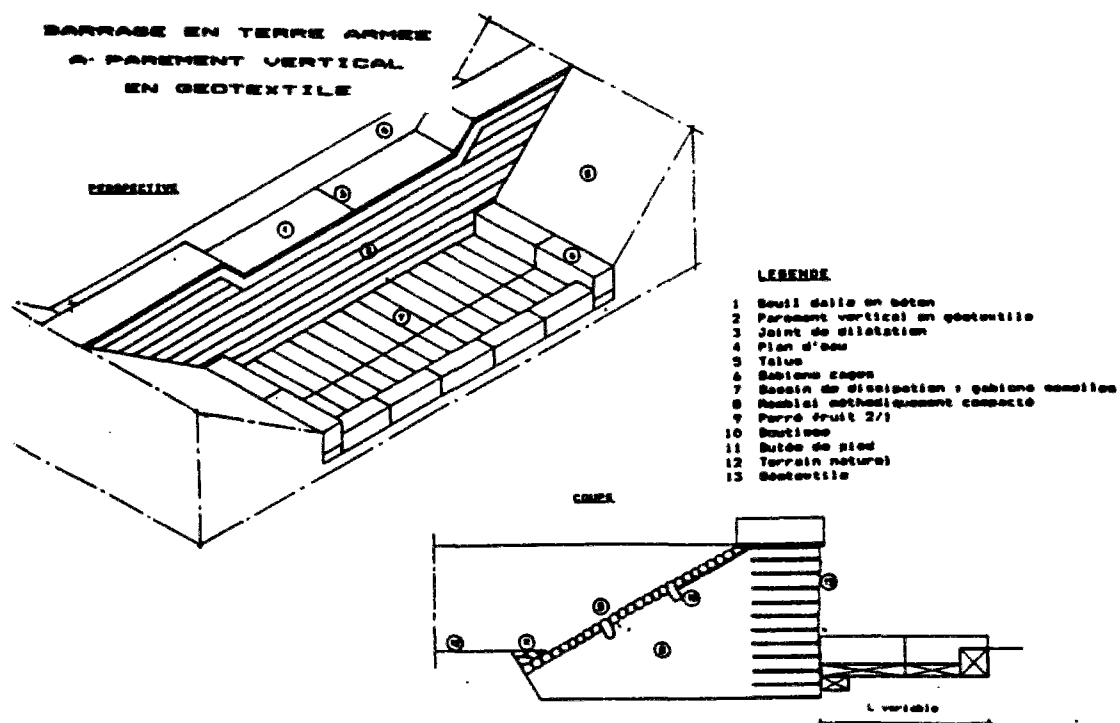


Figure 67 : Barrage en terre armée avec géotextile (extraits de l'article de R.J. COURTAUD, Bulletin de Liaison du C.I.E.H. n° 72 Avril 1988) [72]

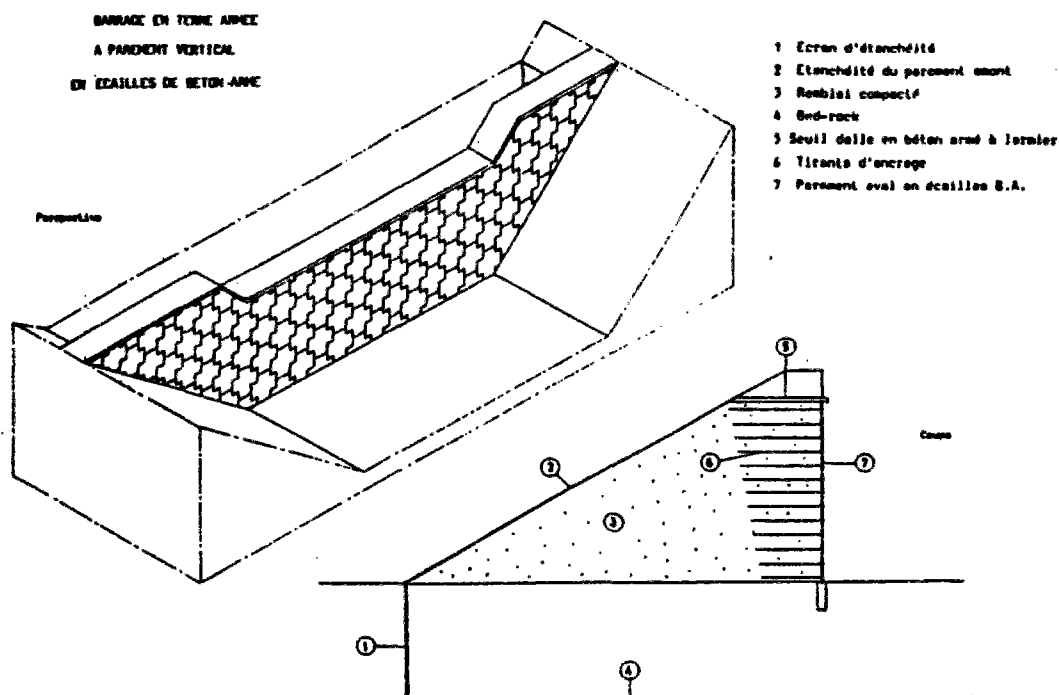


Figure 68 : Barrage en terre armée avec parement (extrait de R.J. COURTAUD [72])

**BARRAGE A NOYAU D'ARGILE ET
ENROCHEMENT POSE A LA MAIN**

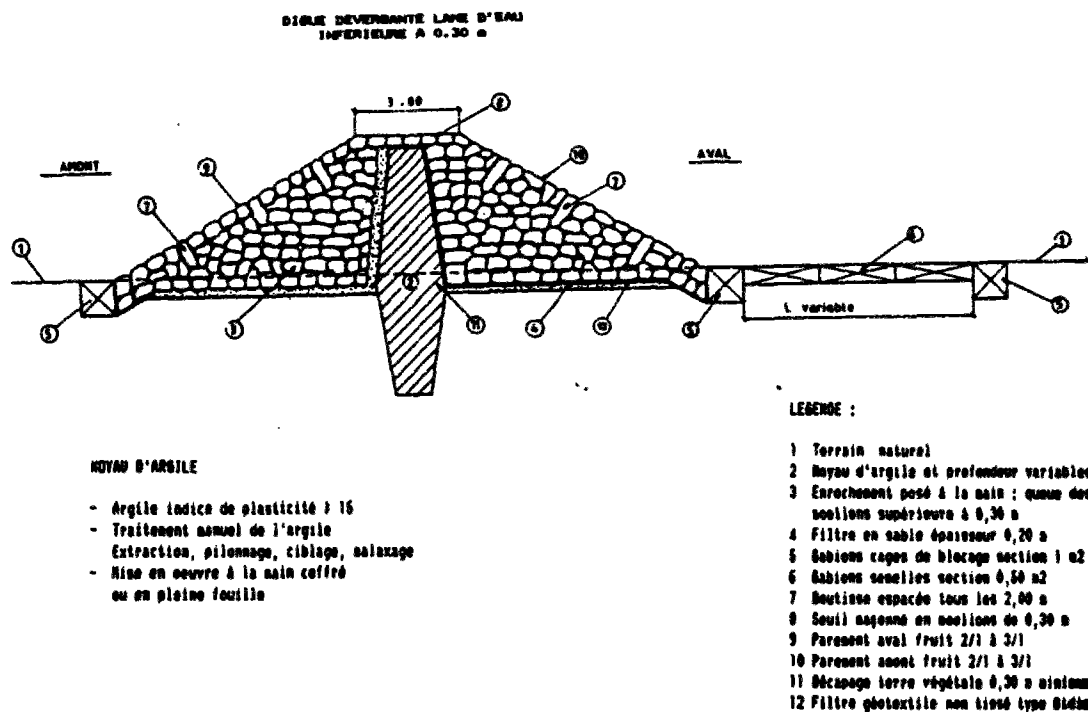


Figure 69 : Barrage en enrochement
(extrait de R.J. COURTAUD [72])

**BARRAGE EN TERRE FAIBLEMENT COMPACTÉE
DIGUE DEVERSANTE A NOYAU D'ARGILE**

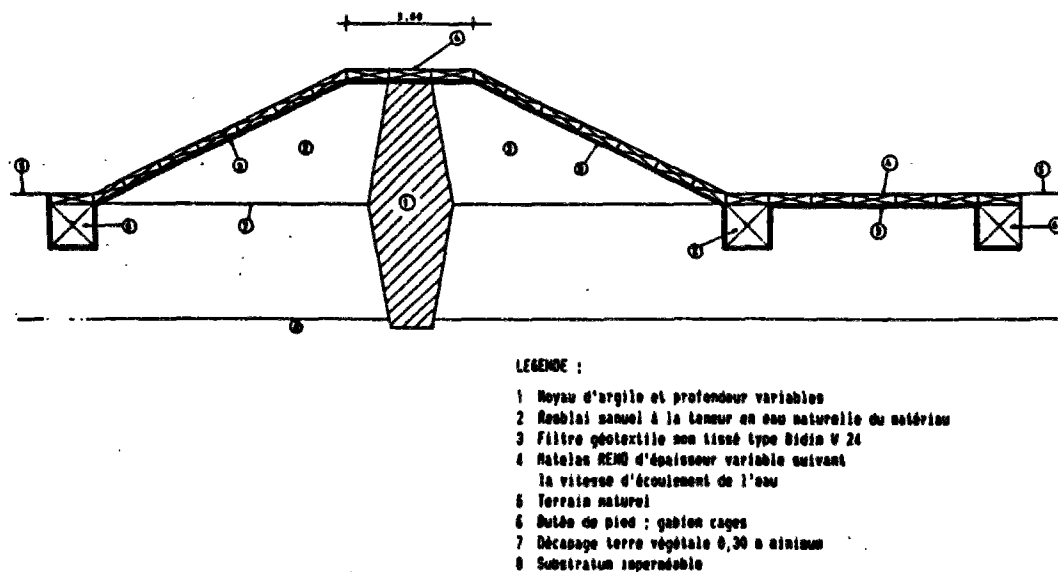


Figure 70 : Barrage en terre
(extrait de R.J. COURTAUD [72])

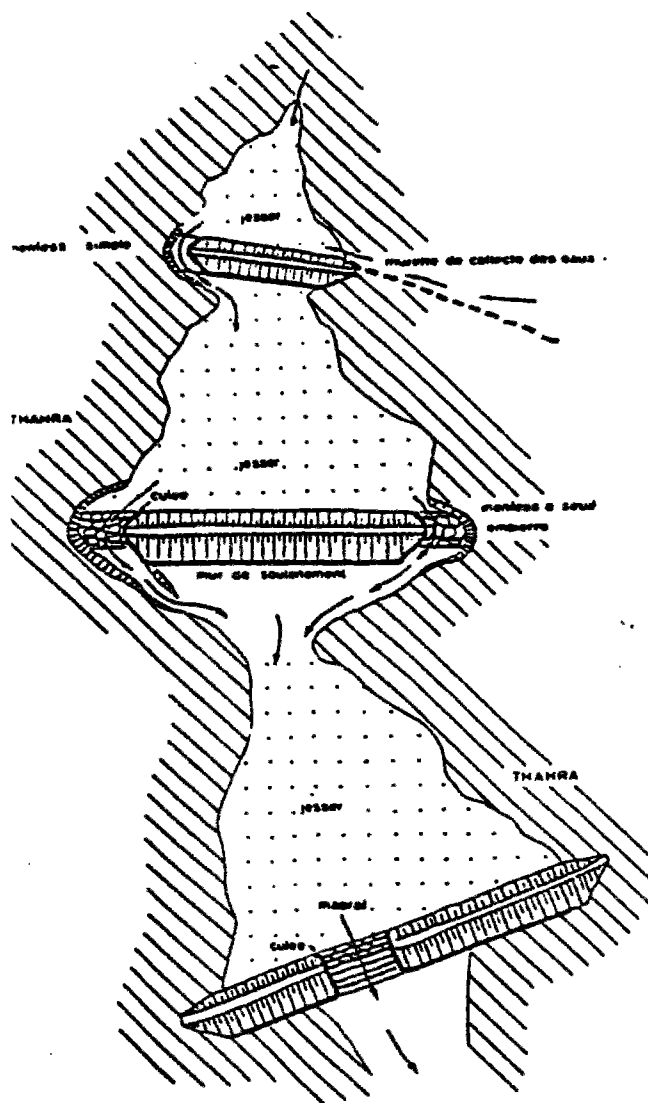
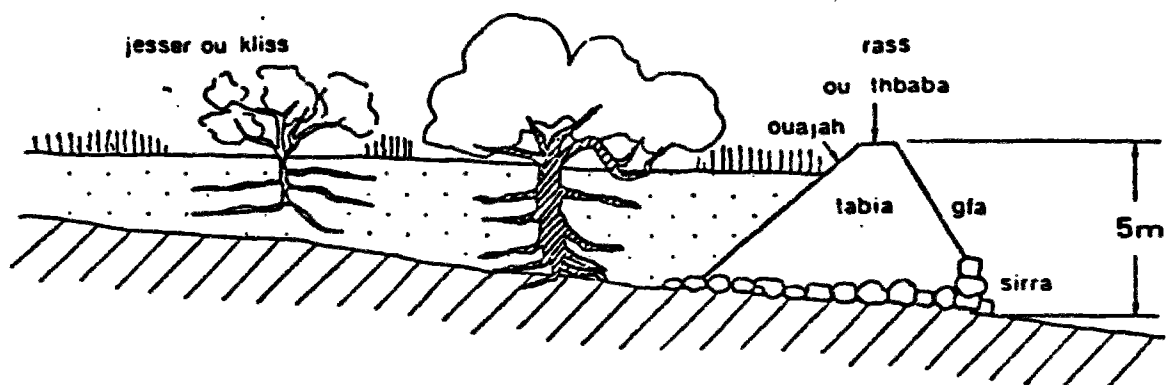


Figure 71 : Ouvrages de petite hydraulique en Tunisie du Sud - déversoir latéral et déversoir central (extrait de J. BONVALLOT [57])



— Profil d'une tabia et de son jesser.

Figure 72 : Profil d'une digue ancienne avec rehaussement des sols (extrait de J. BONVALLOT [57])

a- Risque de destruction des petites retenues en terre

Les petites retenues en terre, qui sont la technique la plus utilisée, présentent des risques de destruction.

Nous allons nous appuyer sur les études que l'ORSTOM⁽¹⁾ a menées lors des inondations de 1979 en Tunisie sur le comportement des ouvrages de petite hydraulique face à des pluies exceptionnelles (J. BONVALLOT [57]).

Quatre jours de pluies violentes se sont abattues sur le Sud Tunisien (région de MEDENINE), détruisant tous les barrages en terre anciens et l'infrastructure routière de la région.

Ces barrages de hauteur variable, entre deux et cinq mètres en général, ont comme fonction de retenir les eaux de pluies et de ruissellement pour l'irrigation, et de concentrer la sédimentation des particules⁽²⁾ (figure 69). Sur la coupe d'un de ces barrages, on peut voir l'accumulation centenaire des terres et la réaction des arbres à ce surhaussement régulier (oliviers..) par la présence de nouvelles racines (figure 70).

Le premier constat de l'auteur de l'étude a été d'établir un lien entre les barrages rompus et leur entretien. 90 % des barrages détruits n'étaient plus entretenus par les agriculteurs, mais il n'y a eu que 30 % de destruction parmi les barrages entretenus régulièrement, soit annuellement.

La rupture de certaines "tabias" (digues) a même provoqué UNE ONDE DE CRUE assez violente pour endommager gravement les routes goudronnées.

Les dernières crues avec dégâts similaires remontaient à 1945 et à 1933, soit 3 crues dévastatrices en 50 ans.

L'étude a relevé d'autres risques de possibilités de ruptures de ce type d'ouvrages. Les brèches par pression ou par débordement sont dues à trois causes principales :

1- soit l'agriculteur a placé le SEUIL du ou des DEVERSOIRS trop haut, par souci de piéger le maximum d'eau et de sol. La digue peut céder alors brusquement par pression, une large brèche évacuant soudain l'eau accumulée et un ravin régressif s'installant ;

2- ou bien, bien que le seuil soit correctement placé, à une cinquantaine de centimètres au-dessus de la surface intérieure, des brèches se produisent dans le corps de la digue ou au niveau du déversoir. Les causes des dégâts se trouvent alors dans le sous-dimensionnement des déversoirs. Dans ce cas-là, les digues cèdent "en série", sous les énormes quantités d'eau accumulées brusquement ;

(1) ORSTOM, Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer

(2) Ils ont aussi comme fonction de créer une petite nappe phréatique temporaire après les pluies

3- ou bien la raison des dégâts doit être recherchée dans un mauvais TRACE systématique des digues vis-à-vis de l'écoulement. Il est souvent difficile de déterminer la ligne de plus grande pente, de façon à édifier la digue de terre rigoureusement PERPENDICULAIRE AU RUISSELLEMENT.

Pour répondre à ce risque, les agriculteurs tunisiens ont construit certaines retenues en forme de V ouvert en direction de l'amont et dont les deux branches forment un angle droit.

Pour que ce système résiste aux fortes pluies, il faut que la bissectrice de l'angle formé suive exactement la ligne de la plus grande pente (figure 73).

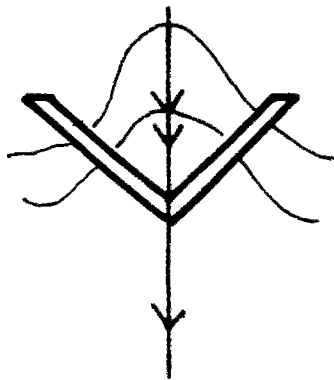


Figure 73 : Onde de crue
Le problème [57]

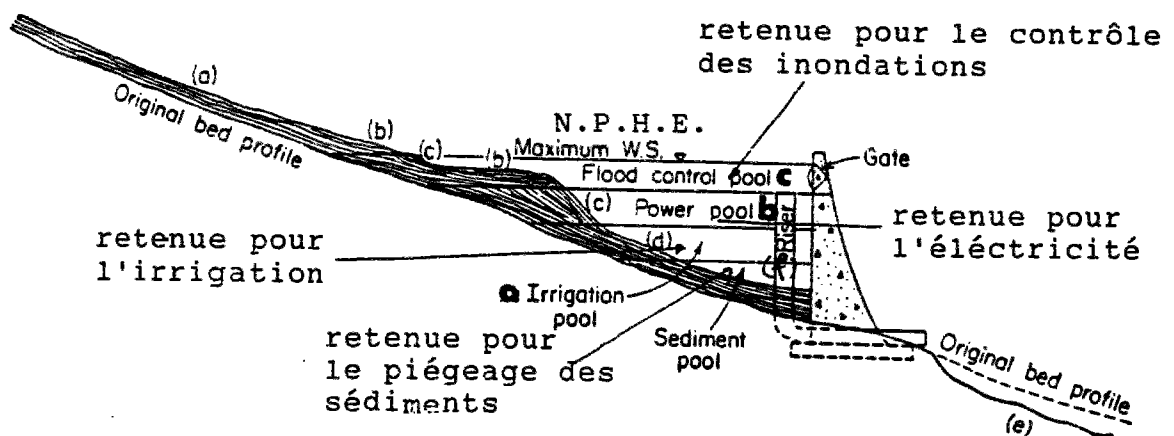


Figure 74 : La pluri-fonction des barrages conduisant à des interventions pluri-ministérielles
a- agriculture, b- industrie, c- équipement
(extrait de Louis C. GOTTSCHALK "Sédimentation" du livre "Handbook of Applied Hydrology" [189])

L'étude montre aussi quelles sont les digues qui ont résisté à ces pluies exceptionnelles. Ce sont les digues en terre de forme trapézoïdale, armées vers l'aval par un mur de pierres sèches, drainées à sa base, et colonisées sur les deux versants avers et revers par la végétation herbacée dont le réseau racinaire accroît la cohésion de l'ensemble.

b- Le risque d'envasement des petits barrages

Tout comme les grands barrages, les petites retenues risquent l'envasement ou la sédimentation, par les particules amenées par le ruissellement.

Nous venons de voir dans la recherche de l'ORSTOM [57] un cas de SEDIMENTATION VOLONTAIRE, pour piéger en amont un sol de plus en plus profond afin de permettre les cultures arborescentes et la céréaliculture.

Nous pouvons aussi citer, au niveau de la recherche fondamentale, les études menées aux U.S.A. par un groupe de chercheurs de l'Université de l'Illinois sur les technologies hydrologiques et hydraulique (Water - resources technology) [189].

C. GOTTSCHALK, dans la partie "sédimentation et réservoirs" rappelle que le processus naturel de la sédimentation est aggravé actuellement par l'extension de l'érosion due aux activités humaines.

Le processus naturel admis, il reste le problème de la rapidité de l'envasement d'un réservoir est, le temps qu'il faudra pour qu'un petit barrage n'ait plus sa fonction de rétention ou d'écrêtement d'orage.

En conséquence, tout concepteur d'ouvrage doit prévoir l'avenir (curage du bassin ...) ou doit étudier les aménagements limitant les déplacements des terres à l'amont de la retenue.

L'auteur préconise aussi de faire une SEDIMENTATION CONTROLEE par la mise en place de portes et verrous provoquant les dépôts, afin de les concentrer et de préserver l'urbanisation en aval du risque d'embourbement lors d'événements exceptionnels (figure 74).

Plusieurs exemples de barrages ayant perdu leur capacité de rétention ou de détention sont cités. Nous pourrions aussi citer comme exemple connu le barrage d'Assouan, dont les dépôts d'éléments fertiles amenés par le Nil commencent à mettre en cause sa capacité de stockage.

c- La pluri-fonction des barrages

Pour en revenir aux recherches de l'Université de l'Illinois, la conception des barrages ou retenues doit prévoir plusieurs fonctions : un niveau pour la sédimentation, un niveau pour l'irrigation, un niveau pour l'énergie et un niveau pour le contrôle des crues, selon la figure 72. Ce n'est pas le cas en France, rappelons-le.

Nous pensons que, tout comme les grands barrages, les petites retenues pourraient avoir plusieurs fonctions : sédimentation, réserves d'eau pour l'IRRIGATION et la lutte contre les incendies, écrêtement du ruissellement d'orage et dépollution des eaux par les principes de lagunage.

1.4.2.2. LES RETENUES COLLINAIRES (HILL DAMS)

Les retenues collinaires désignent des étendues d'eau artificielle utilisant une dépression naturelle entre deux ou plusieurs collines. Ces retenues sont construites en général sur des ruisseaux ou petites rivières à statut privé et servent exclusivement à l'irrigation. C'est une technique de réserves d'eau qui a démarré récemment vers 1980 dans la région du sud-ouest.

a- La pluri-activité des retenues collinaires

L'intérêt de ces ouvrages est de pouvoir répondre à plusieurs activités en plus de l'irrigation. Nous citerons les expériences, en France, d'activité d'AQUACULTURE dans les retenues collinaires d'Adour-Garonne.

L'article de **D. QUINCY** dans la revue "Aqua Revue" (1986) [165] précise la situation des 5 000 retenues collinaires de la région.

Les retenues collinaires sont en général de petites surfaces variant entre 80 et 100 ares, installées en barrage ou en dérivation (figure 75).

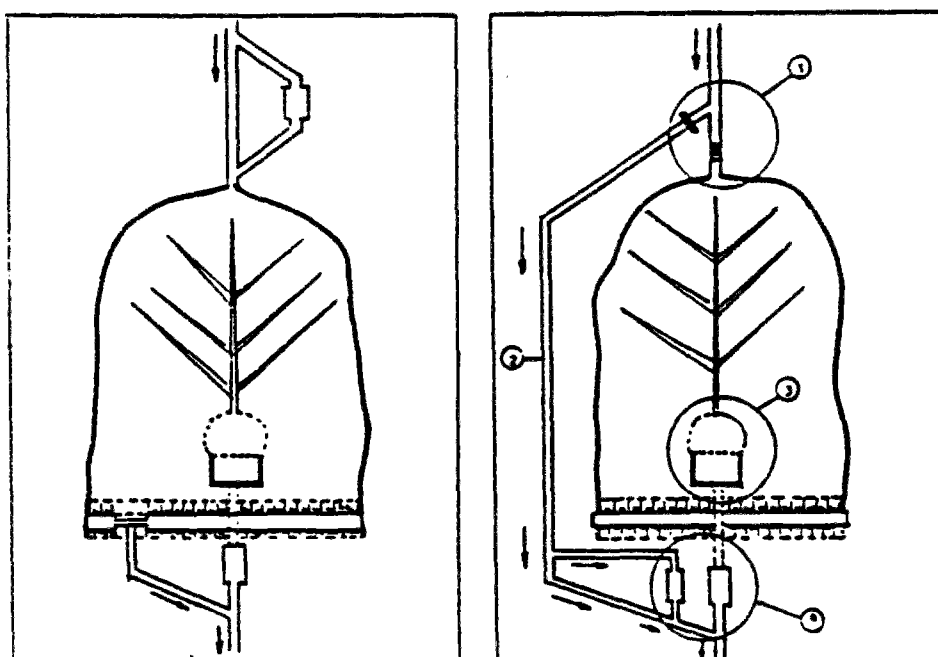
Le Centre d'Etudes Techniques Agricoles (CETA), un peu pour inciter le développement de ces réserves d'eau, a aussi lancé le principe d'activités annexes, comme l'aquaculture (carpes et truites) dans ces bassins pour rentabiliser les plans d'eau destinés à l'irrigation.

A titre d'information, deux techniques d'aquaculture se développent, l'élevage intensif de poissons avec des cages flottantes et l'élevage extensif avec une nourriture naturelle fournie par le phytoplancton et le zoo plancton de l'eau ; la première technique s'adapte mieux aux bassins déjà existants.

Pour le moment, le ministère de l'Agriculture ne retient pas le principe que ces retenues collinaires puissent participer à la rétention des crues exceptionnelles.

Mais de fait, ces retenues sont déjà des tampons, même partiels, contre les lames de crues de ruissellement. Et, de plus, les sédiments qui devraient se déposer à l'aval s'y trouvent piégés.

Nous pensons donc que les retenues collinaires sont une technique favorable à la maîtrise du ruissellement à risque et que leur fonction de RETENTION pourrait être utilisée aussi pour la protection de l'aval. Il faut donc modifier leur conception avec le nouvel objectif de rétention, l'irrigation restant la base de leur fonction et participer au financement à l'aide de subventions.



Etang de barrage

Etang de dérivation
Source : CARA.

- 1- Prise d'eau
- 2- Canal de dérivation
- 3- Système d'évacuateur
- 4- Ecoulement par surverse

Figure 75 : Principes des retenues collinaires [165]
Etang de barrage et étang de dérivation.
(extrait de D. QUINCY [165])

1.5 - L'ETAT DE LA LEGISLATION

Nous aborderons les textes suivants :

- Les textes législatifs relatifs au ruissellement :
Le Code Civil, le Code Rural, le Code de l'Urbanisme.
- Les textes législatifs relatifs au ruissellement de type risque majeur :
Le Plan d'Exposition aux Risques, la loi Montagne, le Porter à Connaissance, la loi sur l'Indemnisation des victimes des catastrophes naturelles.
- Les Circulaires techniques relatives au ruissellement.

1.5.1. ANALYSE DES TEXTES LEGISLATIFS DES DIFFERENTS CODES FRANÇAIS RELATIFS AU RUISSELLEMENT (textes reproduits en annexe 3)

1.5.1.1. LE CODE CIVIL

a- L'article 640 du Code Napoléon, est le plus ancien article sur le ruissellement (1804). Il stipule que le ruissellement doit s'écouler naturellement d'un fonds à un autre, à partir du moment où AUCUNE MODIFICATION n'est intervenue sur le fonds supérieur qui aggrave la servitude du fonds inférieur. Il stipule aussi qu'aucun fonds inférieur ne peut élever une digue (ou un remblai) qui empêche cet écoulement.

Cet article est le principal article qui règle à l'heure actuelle les litiges sur le ruissellement courant et sur lequel s'appuient les procès et les tribunaux.

b- L'article 641 soulève le problème des eaux pluviales au niveau de l'usage : "tout propriétaire a le droit d'user et de disposer des eaux pluviales qui tombent sur son fonds".

Il est donc possible de capter le volume du ruissellement correspondant à sa parcelle, et donc il serait possible de faire de la rétention.

1.5.1.2. LE CODE RURAL

Le Code Rural comprend des articles s'apparentant au ruissellement, par le biais des travaux hydrauliques et des travaux de remembrement.

a- Articles 19 et suivants, en particulier l'article 25 : le remembrement rural (lois du 16 décembre 1964, 11 juillet 1975, 31 décembre 1985)

- Un certain nombre de travaux peuvent être engagés par l'Etat lors d'un remembrement, appelés TRAVAUX CONNEXES, dans le cadre d'opérations menées par le Ministère de l'Agriculture :

- l'arrachage des haies bocagères,
- l'arasement des talus,
- la suppression de chemins creux trop étroits pour la mécanisation et la création de nouveaux chemins,
- le comblement des fossés,
- les travaux de rectification des cours d'eaux non domaniaux, de redressement de rivières.

- Il est à noter que les travaux réalisés dans le cadre du remembrement sont établis en fonction de l'accroissement de la capacité productive des terrains, mais jamais sous l'angle de l'amplification ou de la diminution des crues.

b - Articles 97 à 100 l'endiguement : autorisation par l'Etat de Travaux d'endiguement et de travaux de reprises de lit mineur abandonné.

- Des travaux d'endiguement peuvent être autorisés ainsi que des reprises de lit mineur abandonné par la rivière (suite en général aux travaux d'endiguement) à condition que soient observés les obligations de "débit réservé" et de "débit affecté" (annexe 3.3.).

- Il n'est pas vu dans ces articles le risque des digues prises à revers par le ruissellement, [34], le risque de la diminution des capacités de stockage naturel du ruissellement par la suppression de lit mineur abandonné (naturellement ou artificiellement) ni le problème du "DEBIT MAXIMUM" à risque d'inondations.

Seul est vu le problème du DEBIT MAXIMUM répondant aux problèmes de l'usage de l'eau, de sa répartition, et de sa gestion en période de sécheresse.

c- L'article 134 : suppression des étangs naturels qui pourraient suivant le législateur provoquer des inondations, bien que nous ne voyions pas comment.

d- L'article 135 : le drainage (loi du 21 juin 1865)

- Peuvent être réalisés, par association syndicale, l'exécution et l'entretien de certains travaux tels que le drainage.

- Le drainage des terres agricoles peut être favorable (fossé agricole, retenue collinaire) ou défavorable au ruissellement (drainage souterrain avec rejet à "l'exutoire").

e- Articles 152 à 173 : l'assèchement des marais (concession et contrat)

Les articles ci-dessus du Code Rural autorisent le "dessèchement" des marais et leur mise en culture.

• Autoriser un assèchement d'une zone marécageuse conduit obligatoirement à diminuer les capacités de "rétention naturelle" de la région. Cette diminution de rétention provoque une augmentation des débits d'eau à l'aval des anciens marais, si ce n'est une inondation sur les marais drainés eux-mêmes, lorsque le ruissellement d'une pluie centennale, reprend ses droits ET revient occuper les lieux.

C'est donc l'Etat qui autorise ces travaux, mais aussi qui les SUBVENTIONNE. Par extension, il subventionne tous les travaux de drainage souterrain agricole qui, par le regroupement des eaux de surface infiltrées momentanément, augmentent d'autant les volumes d'eau de rejet qui ne sont plus ni évaporés par le phénomène de l'évapotranspiration, ni infiltrés dans les nappes profondes.

f- L'article 175 : travaux de protection d'aménagement de bassin d'un cours d'eau non domanial et de rectification de cours d'eau.

• L'ARTICLE 175 a la caractéristique d'avoir 7 paragraphes, qui ont la particularité d'être soit positifs pour la lutte contre le ruissellement, soit négatifs par l'augmentation du volume du ruissellement.

- PARAGRAPHES POSITIFS :

Les paragraphes n° 1 et 7 sont appropriés à la lutte contre le ruissellement.

N° 1- Lutte contre l'érosion, défense des torrents, reboisement et aménagements des versants.

N° 7- Aménagement du bassin d'un cours d'eau non domanial ou d'une partie de ce Bassin ...

- PARAGRAPHES NEGATIFS :

Par contre, les paragraphes n° 3, 4 et 5 accentuent le risque majeur de ruissellement. Ce sont :

N° 3- Le redressement et la régulation des canaux et cours d'eaux non domaniaux qui conduit à la SUPPRESSION DES MEANDRES. Ces travaux provoquent une diminution des capacités de stockage, et une accélération des vitesses.

N° 4- Le dessèchement des marais (cf. aussi article 152 à 173).

N° 5- L'assainissement des terres humides et insalubres.

En dehors des problèmes de ruissellement et de rétention naturelle par les lacs, marais, mares, ..., il faut ajouter que la suppression des terres humides, des méandres entraîne la destruction de zones écologiquement très riches, zones que l'on se doit actuellement de préserver.

1.5.1.3. LE CODE DE L'URBANISME

Le Code de l'Urbanisme comprend des articles qui traitent ou permettent de traiter le problème du ruissellement. Ce sont :

a- Les schémas Directeurs et/ou les schémas de Secteurs

Articles L.122-1 et suivants (lois du 30 décembre 1967, 7 janvier 1983 et 22 juillet 1987).

Le schéma Directeur doit préciser l'existence de RISQUES NATURELS au niveau des problèmes intercommunaux pour la coopération intercommunale.

• INTERET DU DOCUMENT

Il est donc possible d'inscrire sur les plans d'urbanisme le risque d'inondation par ruissellement, en mentionnant les conditions météorologiques les plus défavorables connues. Le S.D.A.U. est l'ancien schéma Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme.

b- Le plan d'occupation des sols : P.O.S.

Articles L.123-1 à L.123-12

Le plan d'occupation des sols est établi au niveau des communes. Il prévoit les zones constructibles, les zones inconstructibles, les servitudes des ouvrages publics (voies, ...), les installations d'intérêt général, les espaces verts, etc.

Outre le zonage, le tracé des voies, le P.O.S. prévoit les règles relatives à la desserte, à la nature et l'architecture des constructions, et peut fixer pour chaque zone une règle maximale de densité : le C.O.S.

Le P.O.S. est une création récente (loi du 31 décembre 1976, complétée par les lois du 7 janvier 1983, 22 juillet 1983, 9 janvier 1985, 22 juillet 1987). Il n'est pas encore obligatoire.

• L'INTÉRÊT DU DOCUMENT : la règle maximale de densité -le C.O.S.-

Articles R.112-1 et 2, R.123-22.

Le coefficient d'occupation des sols est le plafond légal de densité liée à la construction ; il réglemente les m² construits. Le C.O.S. pourrait donc devenir aussi le plafond légal d'IMPERMEABILISATION, pour limiter la formation du ruissellement issu des revêtements de sol dans les jardins, si le texte le prévoyait. Le P.L.D. est le Plan Limite de Densité.

c- Le permis de construire

Articles L.421-1 à L.423-5

C'est la procédure d'autorisation préalable la plus ancienne et la mieux connue. Elle s'applique en principe à tout le territoire depuis l'ordonnance du 27 octobre 1945. Le permis de construire n'est accordé que si les constructions projetées sont conformes aux "DISPOSITIONS" législatives et réglementaires

prévues par le Droit de l'Urbanisme (article L.421-3). Il en va de même pour le permis de lotir.

• DISPOSITIONS SPECIFIQUES RELATIVES AUX PERIMETRES SUBMERSIBLES

Une demande de permis de construire dans un périmètre submersible peut être refusée par le Préfet, après consultation du service chargé des mesures de défense contre les inondations et du service chargé de la police des cours d'eau.

Il peut aussi être accordé "qu'à condition d'être assorti des prescriptions nécessaires pour assurer LE LIBRE ÉCOULEMENT DES EAUX OU LA CONSERVATION DES CHAMPS D'INONDATION" (articles R.421-38-15).

• L'INTERET DU DOCUMENT

Le permis de construire apparaît donc comme l'élément clé de contrôle possible des constructions vis-à-vis du risque de ruissellement de type majeur, pour les raisons suivantes :

- par le contrôle du lieu de construction du secteur à risque d'inondation fluviale, qu'il faut élargir au risque d'inondation pluviale,
- par le contrôle des précautions spécifiques contre le ruissellement, à définir au niveau de la construction mais avec des seuils de crues exceptionnelles de type centennal (la crue de Nîmes, par exemple, avec des chutes de pluies de 400 mm en 6 heures).
(surhaussement du bâti, résistance des matériaux à la vitesse du courant, sortie-refuge sur les toits, etc. cf. paragraphe des préventions - chapitre III, 3.4).

d- Le certificat de conformité

Articles R.460-1 et suivants.

Le certificat de conformité est l'élément indispensable de la gestion des permis de construire. Le certificat de conformité permet de vérifier administrativement, par un procès-verbal, que la construction réalisée est bien conforme au permis de construire déposé.

• L'INTERET DU DOCUMENT

L'Administration vérifie donc que les éléments de protection contre le risque du ruissellement, proposés dans les DISPOSITIONS SPECIALES du permis ont bien été appliqués et exécutés.

e- Le certificat d'Urbanisme et les actes de ventes notariés

Article R.410-9 et suivants.

Le certificat d'Urbanisme indique les dispositions d'urbanisme applicables au terrain ... les dessertes du terrain, la constructibilité du terrain, l'arrêté d'alignement, ...

- INTERET DU DOCUMENT

A chaque acte notarié d'acquisition, le nouveau propriétaire peut être informé, au moment de la signature de l'acte, des différentes contraintes afférant son terrain et être informé des risques d'inondation pluviale, en particulier.

f- L'article R.111-3 : la construction sur des terrains exposés à un risque.

Les terrains sont délimités par arrêté préfectoral, pris après CONSULTATION des Services Techniques, Enquête Publique, Avis du Conseil Municipal et de la Commission Départementale de l'Urbanisme.

Cet article est un outil juridique positif puisqu'il permet l'interdiction de construire dans les zones à risque.

Mais il devient négatif s'il y a autorisation de construire. L'article précise que la construction sur des terrains exposés à un risque tel que : INONDATION, érosion, affaissement, éboulement PEUT si elle est autorisée, être subordonnée à des conditions spéciales.

OR nous avons constaté au cours de nos recherches :

- L'oubli systématique des "conditions spéciales" :
 - pour Nîmes, les conditions spéciales ont mis un siècle à disparaître avec les arches murées de la S.N.C.F. (p. 234) ;
 - pour l'Université de Grenoble, les conditions spéciales ont mis 20 ans à disparaître, avec l'occupation des rez-de-chaussée prévues pour les inondations (p. 183) ;
 - pour la Seine-Saint-Denis, la suppression des conditions spéciales dans un lotissement prévu est survenue au bout de 2 ans (p. 244).

- La sous-estimation du risque :

L'article R.111-3 autorise des constructions sur des terrains exposés à un risque, sans préciser l'intensité, la force du risque (période de retour décennale, centennale ou millénaire...?).

Or autoriser une construction, sur la base du risque décennal pour les conditions spéciales, aggrave le danger si le risque est de type centennal.

g- L'article R.111-27 : l'aménagement du littoral : mer et lac

La directive sur la protection de l'aménagement du littoral permet d'organiser et de maîtriser l'urbanisation du littoral pour préserver des espaces naturels écologiquement fragiles. Cette directive concerne donc les marais salants, espace de rétention naturelle saumâtre, les marais terrestres, la liste des communes du littoral et la liste des communes riveraines des grands lacs artificiels ou non.

Cette directive ne parle pas des risques de crue pluviale exceptionnelle. Mais elle pourrait s'adapter aux problèmes de protection des villes balnéaires et lacustres, pour le risque de ruissellement majeur urbain, et aux possibilités de marnage des lacs et marécages (cf. Site de Morlaix chapitre 2 paragraphe 2.4.5.).

h- Le périmètre submersible

Article R.421-38-14.5.

Le plan des surfaces submersibles (P.S.S.) est une obligation administrative qui existe de longue date (1935). Il contrôle l'urbanisation face à l'écoulement des rivières.

Par ce biais, on peut informer de l'étendue d'un lit mineur et d'un LIT MAJEUR, et du risque d'inondation centennale et plus (articles 48 à 54 du Code du Domaine Public Fluvial).

i- Le projet d'intérêt général (P.I.G.)

Article L.121-12 et suivants.

Les P.I.G. peuvent inclure la prévention des risques naturels, tels que l'inondation par ruissellement et l'inondation par débordement.

Les projets d'intérêts généraux n'ont pas été développés à leur juste mesure. Ils mériteraient d'être utilisés pour le risque majeur de ruissellement.

1.5.2. LES TEXTES LÉGISLATIFS RELATIFS AU RUISELLEMENT DE TYPE RISQUE MAJEUR

1.5.2.1. LE PLAN D'EXPOSITION AUX RISQUES (P.E.R.) [37]

Mis en oeuvre en 1984. Lois du 22 juillet 1987, 13 juillet 1992 et 15 mars 1993.

Les P.E.R. déterminent les risques naturels majeurs et en particulier les champs d'inondation (P.E.R.I.).

• ARTICLE 5-1 : "l'Etat élabore et met en application les plans d'exposition aux risques naturels prévisibles, qui déterminent notamment les zones exposées et les techniques de prévention à y mettre en oeuvre, tant par les propriétaires que par les collectivités ou les établissements publics ...".

• ARTICLE 42 : "les P.E.R. déterminent les dispositions à prendre pour éviter de faire obstacle à l'ÉCOULEMENT DES EAUX et de restreindre les CHAMPS D'INONDATION".

- LES DOCUMENTS : la cartographie des risques comprend pour les P.E.R.I. :
 - la carte morphologique du champs d'inondation (berges, digues),
 - la carte indicative des hauteurs d'eau (figure 76),
 - la carte indicative des vitesses (figure 77),
 - la carte informatique des crues historiques (C.I.C.H.),
 - la CARTE D'ALEA, document de synthèse des paramètres de la crue centennale (Q 100) avec indications de la crue décennale (Q 10) (figure 78),
 - le plan de vulnérabilité,
 - le plan de ZONAGE du P.E.R. avec les trois zones submersibles:
 - la zone blanche ne comportant pas de risques,
 - la zone bleue, moyennement exposée, nécessitant des mesures de protection,
 - la zone rouge inconstructible.
- CONSTAT : des difficultés

Malgré la volonté de l'Etat d'appliquer les P.E.R., de nombreuses difficultés sont apparues pour leur élaboration ; ce sont des dossiers longs et coûteux. Sur les 628 communes retenues en 1987 pour un programme pilote de P.E.R., 382 P.E.R. ont été prescrits, 82 publiés et 4 approuvés (article de Alain JACQ, Responsable de la Sous-Direction des Eaux, Ministère de l'Environnement, revue Métropolis 1987 n° 78/79 [126]). La loi apparaît contrecarrée par des contraintes financières trop fortes pour les plans et les études, et des techniques de prévention "trop légères" voire inexistantes pour les réalisations.

1.5.2.2. LA LOI MONTAGNE du 9 janvier 1985

• L'ARTICLE 78 prévoit que "dans les zones de montagne, en l'absence de plans d'exposition aux risques naturels, les documents d'urbanisme, ainsi que les projets de travaux, constructions ou installations soumis à une demande d'autorisation.... tiennent compte des RISQUES NATURELS SPECIFIQUES à ces zones, qu'il s'agisse de risques préexistants connus ou de ceux qui pourraient RESULTER des MODIFICATIONS de milieu envisagées".

1.5.2.3. LE PORTER A CONNAISSANCE (P.A.C.)

Circulaire du 20 juin 1988 dans le cadre de l'élaboration des P.O.S. :

- carte d'aléas des crues Q10 et Q100 (échelle 1/50000è),
- carte d'aléas des crues exceptionnelles.

LE PRÉFET, représentant de l'Etat, doit prévenir une municipalité des risques naturels qui la concernent et qu'elles doit prendre en compte.

"L'Etat doit AFFICHER les risques en déterminant leurs localisations et leurs caractéristiques et en veillant à ce que les divers intervenants les prennent en compte dans leur action. Les cartes d'aléas sont jointes à l'avis de l'Etat.



Figure 76 : la carte indicative des hauteurs d'eau
 (extrait du document du Ministère de l'Équipement sur les
 P.E.R. [37])

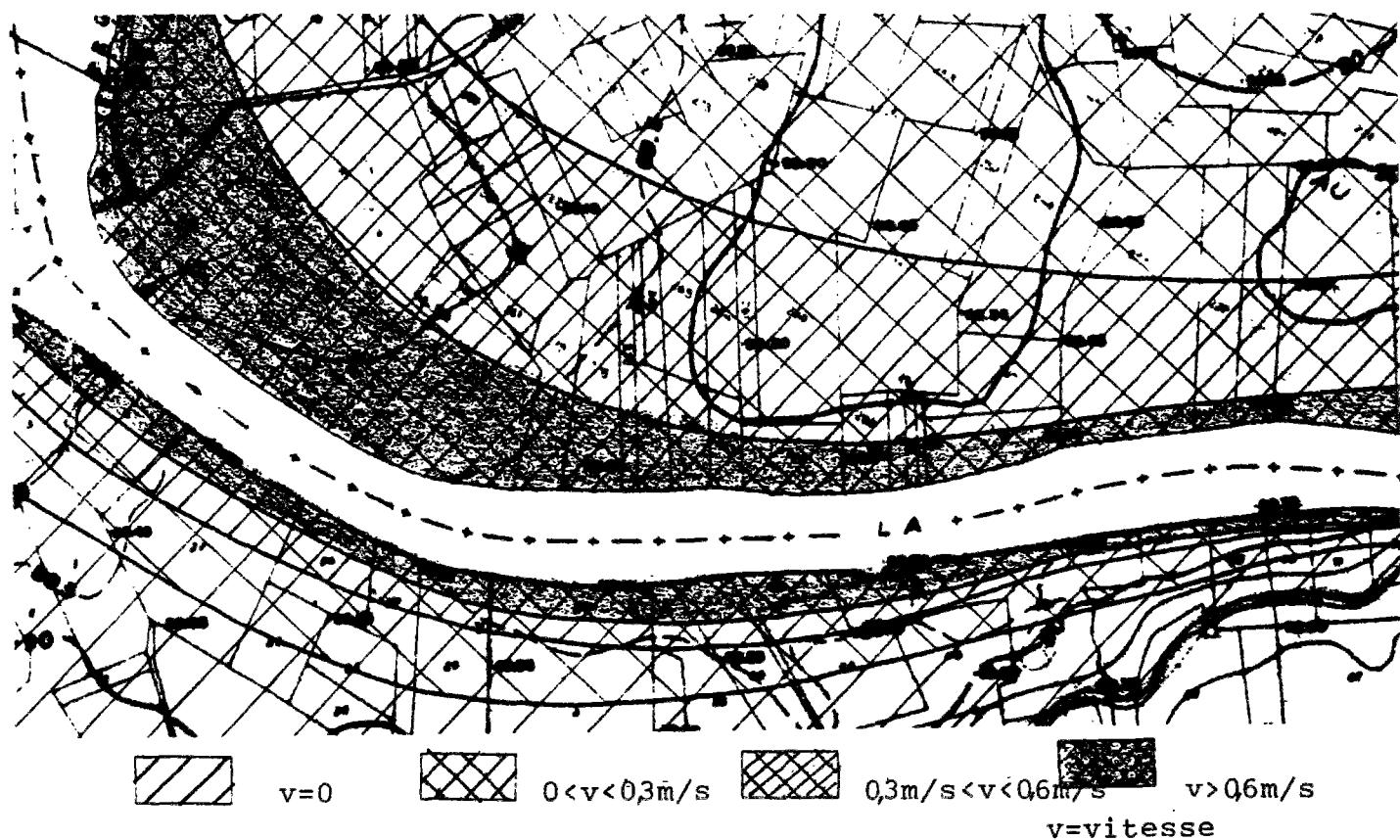
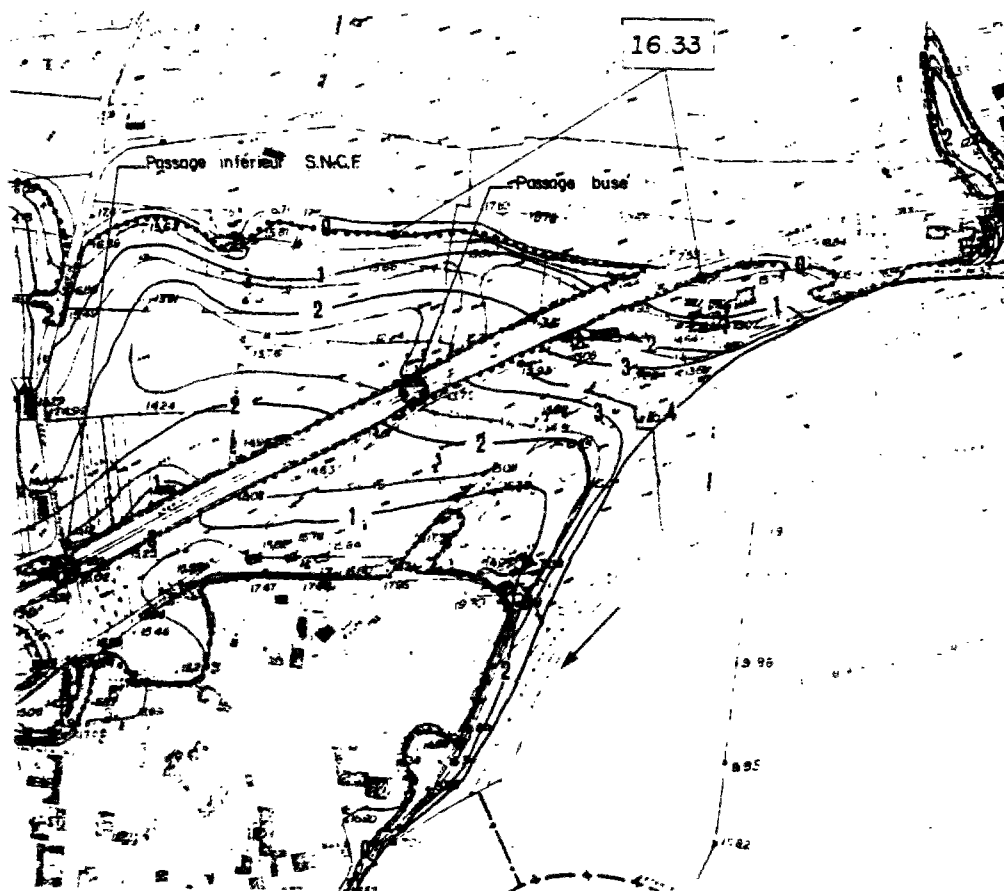


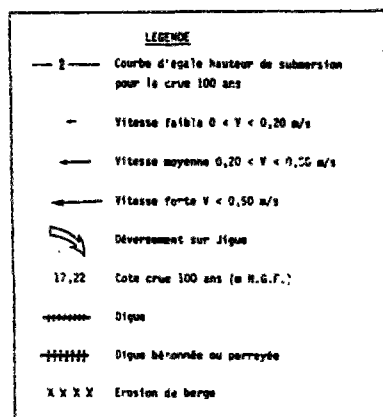
Figure 77 : Carte indicative des vitesses (P.E.R.)
 (extrait du document du Ministère de l'Équipement [37])

La carte d'aléa

Il s'agit du document de synthèse qui présente les limites du champ d'inondation des crues de référence à partir de la cote NGF des lignes d'eau, ainsi que la valeur des différents paramètres caractéristiques retenus : hauteur, durée de la submersion, vitesse.



Carte synthétique des paramètres



DURÉE DE SUBMERSION CRUE 100 ANS		
en fonction de la hauteur H de submersion		
0 à 3 jours	pour	$0 < H < 1m$
3 à 6 jours	pour	$1 < H < 2m$
6 à 8 jours	pour	$2 < H < 3m$
8 à 11 jours	pour	$3 < H < 4m$
plus de 11 jours	pour	$H > 4m$

Dans le casier de BARIÉ la règle ci-dessus s'applique avec cependant en moyenne 2 jours de submersion de plus pour l'aval du casier. Les mêmes durées de submersion que dans le tableau ci-dessus pour l'amont du casier.

HAUTEURS DE SUBMERSION CRUE 10 ANS
Elles se déduisent des hauteurs de la crue 100 ans pour soustraction de 1,60 m en moyenne

Figure 78 : La carte d'aléa (P.E.R.) (extrait du document du Ministère de l'Équipement [37])

• LES DIFFICULTES

Si le risque est connu, l'Etat peut rappeler les obligations des municipalités, mais le problème reste entier pour les risques majeurs inconnus ou oubliés, dont seuls quelques anciens du terroir, très âgés, ont entendu parler.

1.5.2.4. L'INDEMNISATION DES VICTIMES DES CATASTROPHES NATURELLES (loi du 13 juillet 1982)

Les assurances offrent une protection spécifique pour les catastrophes naturelles, du moment que l'on assure un bien. Par cette loi, l'Etat s'engage à rembourser toutes les victimes, même non assurées, à partir du moment où la localité est déclarée région sinistrée par catastrophe naturelle au Journal Officiel.

• CONSTAT : LES DIFFICULTES

L'assurance d'un bien immobilier n'est pas obligatoire à l'inverse de l'assurance automobile. De plus, les personnes assurées de longue date n'ont pas forcément renouvelé les clauses de leur assurance depuis 1982, car elles perdent l'avantage des primes anciennes très avantageuses. Enfin, c'est le demandeur qui doit mentionner le risque, qu'il ne connaît par forcément, auprès de l'assureur.

La catastrophe de Vaison-la-Romaine est un exemple des limites de cette loi : six mois après, aucun sinistré n'avait été dédommagé, ce qui a expliqué l'intervention du Président de la République auprès de la Municipalité et des assureurs, en février 1993 pour demander l'accélération des demandes de remboursements des sinistrés. En juillet 1993, la situation des sinistrés n'a pas évoluée.

1.5.3. LES TEXTES TECHNIQUES RELATIFS AU RUISSELLEMENT

La France s'est appuyée sur trois textes techniques principaux pour résoudre les problèmes d'assainissement et de ruissellement depuis 1945. Ce sont :

1.5.3.1. LA CIRCULAIRE INTERMINISTÉRIELLE DE 1949 C.G.1333 dite circulaire CAQUOT, relative aux réseaux d'assainissement

Cette circulaire a organisé, pendant la période de la reconstruction après guerre, les réseaux d'assainissement urbain sur toute la France où "les eaux de pluie devaient être évacuées le plus rapidement possible", sur le principe du réseau unitaire⁽¹⁾. Nous verrons quel a été son impact sur le ruissellement risque majeur (cf. 3.1.).

(1) Réseau unitaire : réseau d'assainissement comprenant les eaux usées et les eaux pluviales

1.5.3.2. LA CIRCULAIRE INTERMINISTÉRIELLE DE 1977 dite circulaire LORIFERME, relative aux réseaux d'assainissement

Cette circulaire est venue répondre aux problèmes suscités par la circulaire CAQUOT de 1949 en proposant, pour les réseaux d'assainissement des agglomérations, un réseau séparatif et des rétentions de type bassins de retenues. Les calculs ont été facilités par l'existence d'abaques (graphismes et pré-calculs) mais avec comme principal inconvénient de n'aller que jusqu'aux crues d'occurrence décennale seulement.

1.5.3.3. LA CIRCULAIRE INTERMINISTÉRIELLE DE 1984, relative à "l'assainissement autonome individuel"

(cf. les "contraintes d'assainissement individuel au niveau de la parcelle" Service Technique de l'Urbanisme [198]).
(Arrêté du 3 mars 1982 et circulaire du 20 août 1984 du Ministère de la Santé, de l'Urbanisme et du Logement et de l'Environnement).

Cette circulaire est venue répondre aux problèmes de saturation des stations d'épuration et aux problèmes de débordement du réseau d'égouts.

Les eaux d'égouts et les eaux ménagères sont stockées à la parcelle, dépolluées puis en général infiltrées sur place.

La technique de l'assainissement autonome a permis de ne pas bloquer le développement de l'urbanisation ; elle a été appliquée depuis 10 ans par les villes comme Toulouse, qui garde le contrôle de la GESTION des ouvrages privés par le service municipal qui accède aux ouvrages.

Mais la circulaire ne concerne pas l'évacuation des eaux pluviales de la toiture et de la surface de la parcelle "qui doivent faire l'objet d'une évacuation appropriée" ... non précisée.

CONCLUSION

L'étude bibliographique du chapitre 1 avec l'état des recherches fondamentales et l'analyse des textes législatifs, nous a permis de faire le point sur les connaissances du phénomène du risque urbain de ruissellement.

Nous avons analysé 41 textes sur les 250 documents lus, qui nous semblaient les plus proches de notre recherche.

Nous avons décrit la naissance du phénomène du ruissellement en nous appuyant sur 14 ouvrages [40, 67, 77, 86, 106, 135, 144, 157, 163, 172, 173, 186, 189, 235].

Nous avons, pour la prévision du ruissellement, choisi des chercheurs dans les trois domaines : milieu agricole, milieu forestier et milieu urbain, et fait une approche des différentes méthodes de prévision : méthodes naturalistes, méthodes déterministes et modèles hydrologiques en analysant 18 ouvrages [48, 53, 56, 68, 74, 82, 103, 104, 110, 112, 127, 128, 136, 138, 155, 158, 160, 191].

Pour la protection contre le ruissellement, nous avons pris l'état des recherches dans plusieurs pays -U.S.A., R.F.A., France, Italie- soit 9 ouvrages clefs [57, 72, 89, 103, 142, 151, 165, 184, 189].

Les auteurs représentent des disciplines variées que nous citons : géomorphologue, botaniste, forestier, agronome, géographe, hydrologue, hydraulicien, ingénieur.

Enfin, pour la législation, nous avons vu les différents codes (Code Civil, Code Rural et Code de l'Urbanisme) avec les lois relatives au ruissellement de type risque majeur, et les circulaires techniques régissant les eaux pluviales.

Ces textes nous ont aidé à élaborer la suite de notre travail, même si nous ne partageons pas toujours le même avis que celui des auteurs. Ils nous ont permis de cerner la multiplicité des phénomènes de ruissellement.

Nous allons aborder, dans le chapitre 2, l'état de la situation sur le terrain, ce qu'il en est concrètement de ce risque et de ses conséquences.

DEUXIEME CHAPITRE

ANALYSE DE CATASTROPHES

LIEES AU RUISSELLEMENT RISQUE MAJEUR

	Pages
2.1. INTRODUCTION	
2.2.- DESCRIPTION DE CATASTROPHES	
2.2.1. ♦ Catastrophes majeures	
• LA CATASTROPHE DU GRAND-BORNAND (1987)	139
• LA CATASTROPHE DE NÎMES (1988)	144
• LA CATASTROPHE DE PARIS ET DE LA SEINE-SAINTE-DENIS (1990)	149
• LA CATASTROPHE DE VAISON-LA-ROMAINE (1992)	157
2.2.2. ♦ Catastrophes annexes	
• BRIVES - CHARENSAC (1980)	163
• CARROS - GATTIÈRES (1981)	167
• BEDARRIDES (1992)	167
2.2.3. DESCRIPTION SYNTHÉTIQUE DES CATASTROPHES	169
2.3.- LA GESTION DE LA CRISE	
• LA GESTION COLLECTIVE DE LA CRISE	173
• LE COMPORTEMENT INDIVIDUEL PENDANT LES CRISES	178
2.4.- DES CATASTROPHES PREVISIBLES	
• CATASTROPHE PRÉVISIBLE À L'UNIVERSITE DE GRENOBLE	183
• CATASTROPHE PRÉVISIBLE DE LA RIVIERE LE PAILLON À NICE ET INONDATION DU LYCEE D'ÉTAT	185
• CATASTROPHE PRÉVISIBLE À CLERMONT-FERRAND	187
• CATASTROPHE PRÉVISIBLE À LANSLEBOURG - MONT-CENIS -VALLEE DE LA MAURIENNE	191
• CATASTROPHE PREVISIBLE À MORLAIX, VILLE BALNÉAIRE DE BRETAGNE	191
CONCLUSION	

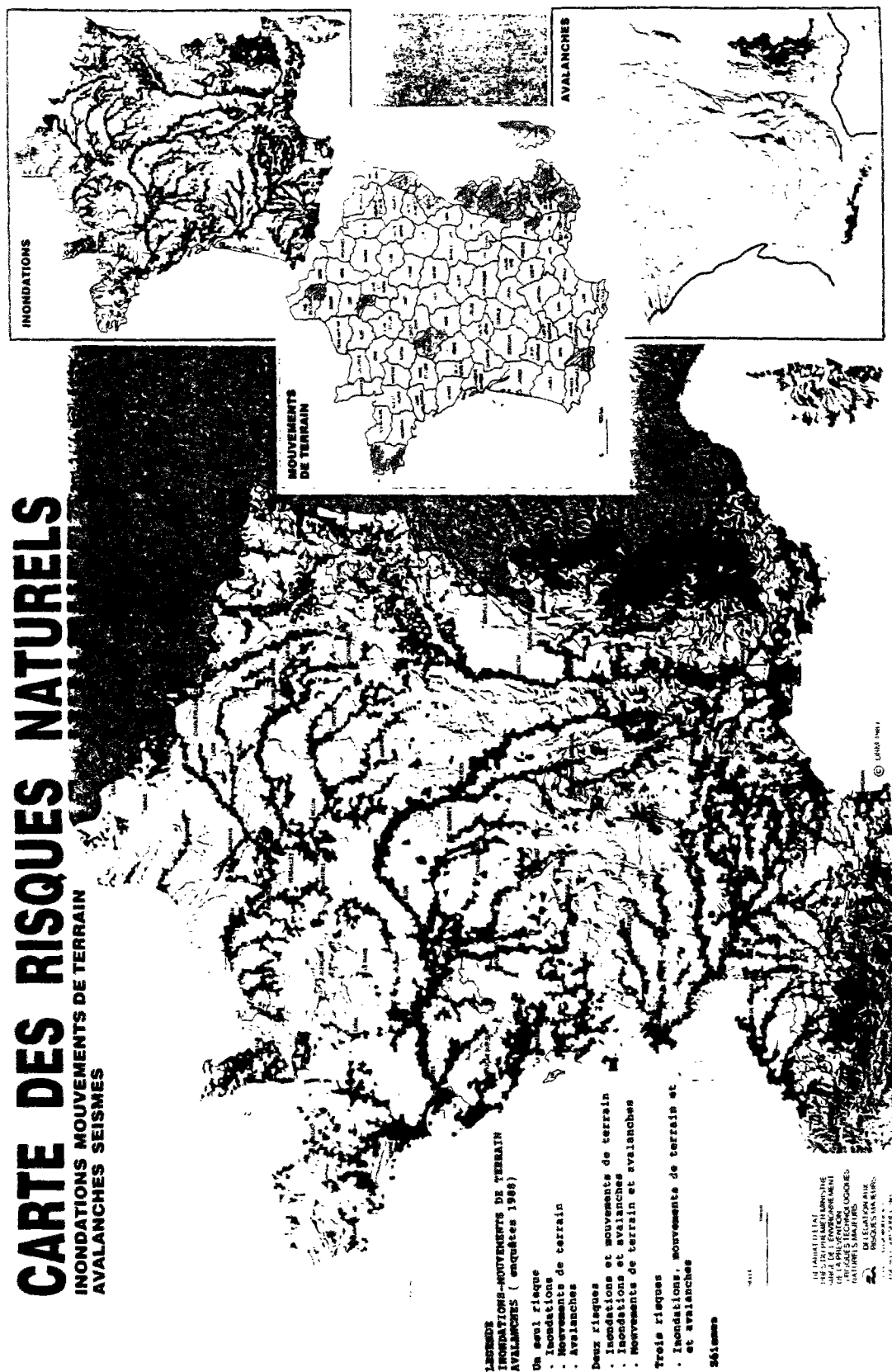


Figure 79 : Carte des Risques du Ministère de l'Environnement

ANALYSE DE CATASTROPHES LIEES

AU RUISSELLEMENT RISQUE MAJEUR

2.1. INTRODUCTION

Le chapitre II comprend trois parties :

- 1- la description des catastrophes.
- 2- la gestion des crises.
- 3- des catastrophes prévisibles.

• Méthode de travail

Nous avons procédé à l'analyse en nous appuyant sur trois sources :

- les rapports officiels de mission d'enquête et les dossiers techniques,
- les articles de presses et analyses photographiques,
- les interviews d'organismes très divers ayant été de préférence ACTEURS des événements, tels que le corps des sapeurs-pompiers, et les bases d'Electricité de France.

• Les similitudes entre les catastrophes

Nous notons, entre les catastrophes, les similitudes suivantes :

- ces catastrophes touchent toute la France et les régions de montagne comme des régions de plaine,
- elles sont dues à des orages très violents issus de nuages type cumulo-nimbus (Cu Nb),
- la catastrophe a une durée très brève : elle varie entre une heure, trois heures et six heures (montée des eaux et décrue comprises),
- les eaux envahissent les rues, les rez-de-chaussée, les caves, les ouvrages souterrains,
- la vitesse du courant est très importante,
- les embâcles sont principalement des embâcles de voitures et caravanes,
- les dégâts sont énormes, et les coûts de réparation élevés,
- risque de décès.

2.2.- DESCRIPTION DES CATASTROPHES

2.2.1. ♦ CATASTROPHES MAJEURES (carte officielle, figure 79)

Nous avons choisi quatre catastrophes majeures récentes survenues en France pour cerner le danger du ruissellement :

- la catastrophe du Grand-Bornand,
- la catastrophe de Nîmes,
- la catastrophe de Paris et de la Seine-Saint-Denis,
- la catastrophe de Vaison-la-Romaine.

2.2.1.1. LA CATASTROPHE DU GRAND-BORNAND 14 JUILLET 1987

Documents : Mission d'enquête d'août 1987 : rapport SOULIMAN [42]
Rapport du Cemagref - Grenoble M. MEUNIER [26]
Articles de presse
Livre de Renaud Vie le Sage "La terre en otage" [45]
pp. 16 à 20

1. Fiche descriptive (figure 80)

a- Les données

- **SITUATION** : Village de montagne de la Haute-Savoie (près de La Clusaz) - Altitude 910 mètres - Sommets alentours 2 000 à 2 500 mètres.
- **CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES** :
Orages d'été avec nuages de type cumulo-nimbus.
- **CONDITIONS MORPHOLOGIQUES** :
Surface du bassin-versant et des sous-bassins.
75 km x 95 km = 7 125 km² (en vue planimétrique).
- **CARACTÉRISTIQUES DE L'INONDATION** :
Durée de l'orage : 2 heures 30.
Total des chutes de pluies : 93,2 mm [42].
Impacts nombreux de foudres.
Durée de l'inondation : 18 h 30 à 20 h 30 soit 2 heures.
- **DÉBIT DE CRUE ÉVALUÉ** :
 - 150 m³/s rapport SOULIMAN,
 - 200 m³/s étude Cemagref.
- **PÉRIODE DE RETOUR** :
Météorologie Nationale = 7 ans.
Rapport Souliman = 50 ans.
Etudes Cemagref = 200 ans.

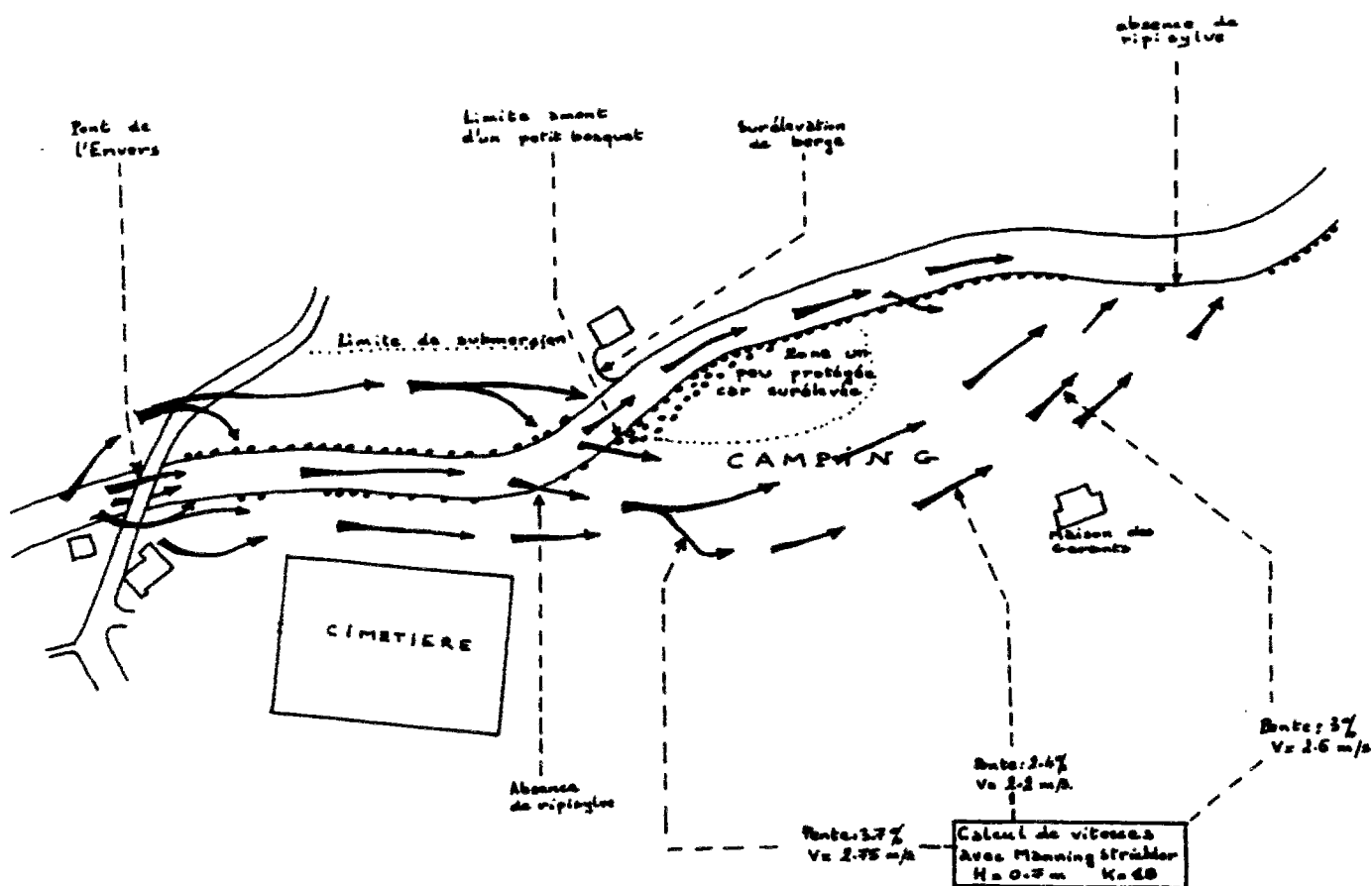


Figure 80 : Plan du Camping du Grand-Bornand
 Dessin de M. MEUNIER, Cemagref [26]
 La bifurcation des eaux n'est-elle pas due à un tracé d'un ancien bras-mort comblé ?

- inondation du premier camping rive droite avec submersion des protections (endiguements).
- embâcles importantes au niveau du pont d'amont d'arbres et débris de végétaux.

b- Les dégâts :

- 27 morts (campeurs),
- destruction de voitures et caravanes emportées,
- coupures de courant avec interruption des Télécom et impossibilité de demandes de secours,
- destruction d'un pont et de 700 m de route en amont.

c- Les crues historiques :

Il semblerait qu'il y ait eu, au XIXème siècle, cinq crues avec des débits maximaux supérieurs à ceux de la catastrophe du 14 juillet 1987.

D'après M. MOUGIN et son ouvrage sur "les torrents de Savoie" de 1914, nous y trouvons deux crues historiques particulièrement fortes [29] :

- 1830 : 244 m³/s,
- 1845 : 215 m³/s,
- 8,9 juillet 1879 : catastrophe.

d- Les documents d'urbanisme récents

La crue de 1936 est ignorée dans les documents d'urbanisme. La précipitation exceptionnelle du 21 septembre 1968 enregistrait 151,5 mm.

- Un plan sommaire d'urbanisme a été approuvé en 1971 avec, comme seul risque naturel mentionné, un risque d'avalanches de rochers en vallées de Chinaillon.
- Le règlement du P.O.S.. (1974-1981) classe la zone du camping du BORNE en secteur NDa, zone de protection de sites et paysages, mais non en zone inondable.

2. La catastrophe

Cette catastrophe surprend par la rapidité de l'événement (trois heures au total de crue et décrue), le débordement de la rivière, la lame d'eau de 1,00 mètre environ sur le camping et la vitesse du courant emportant voitures et caravanes habitées.

3. Le comportement des individus

Les campeurs

A cause de la pluie, les gens cherchent refuge sous les tentes et dans les caravanes, et donc ne voient pas l'aggravation du risque, les premiers débordements de la rivière.

Les gestionnaires des campings

Le gestionnaire du camping rive gauche (le moins menacé) évacue les gens manu-militari.

Les secours

Le codis⁽¹⁾ régional situé à 500 mètres du camping n'est pas informé de ce drame proche. C'est une personne qui ira les avertir alors que les premières voitures sont déjà emportées. C'est sur un retour de mission que l'hélicoptère sauve les personnes réfugiées sur un remblai d'une digue qui sera submergée.

Les gens du terroir du village d'au-dessus ne s'occupent pas d'avertir le camping du risque de cette zone inondable. Ils s'occupent de mettre à l'abri leurs biens (denrées, voitures,...) (cf. interview Madame de VANSSAY, CREDA⁽²⁾).

(1) CODIS : Centre Opérationnel de la Direction des Services d'Incendie et de Secours

(2) CREDA : Centre de Recherches sur les Dysfonctions de l'Adaptation (Ecole de Médecine - Paris)

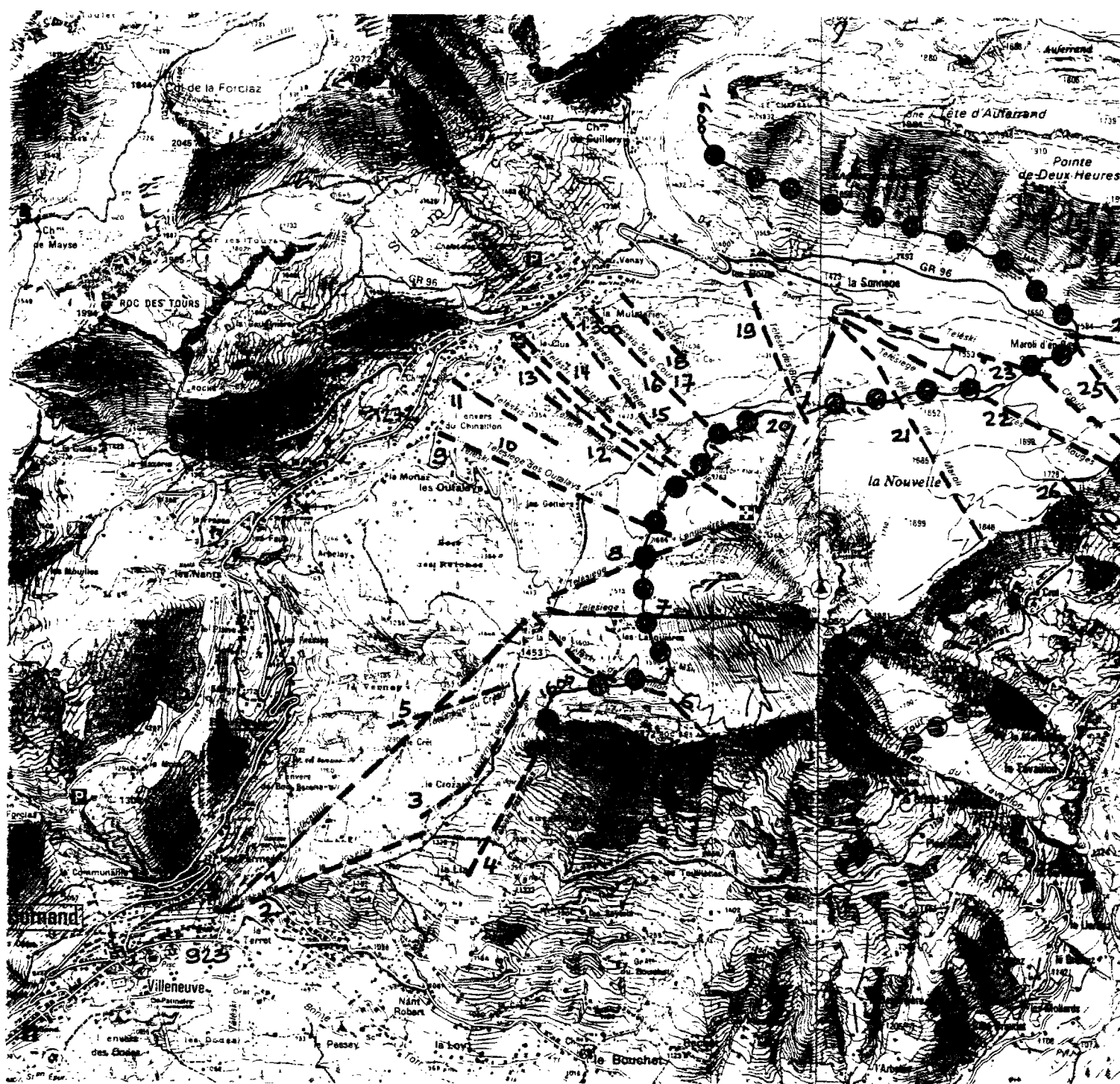


Figure 81 : Les remontées mécaniques de sports d'hiver du Grand-Bornand (Mont Lachat) extrait de carte I.G.N. au 1/25.000 .

4. Les divergences

Des avis divergents : des éléments défavorables ?

Les décès sont-ils dus aux causes suivantes ?

- les embâcles de végétaux qui ont obstrué l'arche du pont d'amont, bloquant l'eau jusqu'au débordement du tablier,
- l'édification de petits endiguements le long du camping, au niveau du coude de la rivière, considérés comme éléments négatifs, car construits sans autorisation administrative (cf. rapport SOULIMAN) [42].

Notre avis : éléments favorables

- les embâcles de végétaux dans l'arche du pont peuvent être considérés comme positifs, car ils ont formé un "Bassin de rétention naturel" bloquant les eaux pendant un moment, ce qui aurait pu permettre l'évacuation des campeurs vers les pentes ;
- les diguettes de protection du lit mineur, où ont trouvé refuge les sinistrés sauvés, même si ces diguettes constituent de véritables pièges à partir du moment où elles sont submergées, peuvent être considérées comme éléments favorables.

Eléments défavorables

- le risque d'inondation n'était pas prévu : ni plan d'évacuation, ni alarme sonore.
- la non-solidarité entre les gens du terroir et les touristes du camping : un audiovisuel a été tourné pendant le drame et le "SON" a dû être censuré, vu les propos tenus par des personnes se moquant de "petites fourmis" entraînant de se noyer.
- le développement du domaine skiable du Grand-Bornand dont les pistes constituent, comme à Chamonix, des zones de ruissellement privilégiées et sans végétation (ni arbres, ni engazonnement) pour briser les vitesses.

Nous avons recensé 24 remontées de ski sur le Grand-Bornand construites depuis 1960 (carte IGN figure 81), ce qui représente 72 couloirs environ favorables au ruissellement, la tranchée de montée de l'ouvrage et les différentes pistes et des centres (facile, moyenne, difficile).

2.2.1.2. LA CATASTROPHE DE NÎMES 3 OCTOBRE 1988

Documents : Mission d'enquête d'avril 1989 : rapport PONTON [39]
Dossier d'étude du Cabinet MERLIN de décembre 1988 [24]
Livre de la Ville de Nîmes "Nîmes" le 3 octobre, un an après publié pour la cérémonie commémorative de 1989 [47]
Articles de presse
Interviews : Sapeurs-Pompiers, sous-groupe EDF Production Transport, Compagnie Nationales du Bas-Rhône Languedoc-Roussillon (B.R.L.)

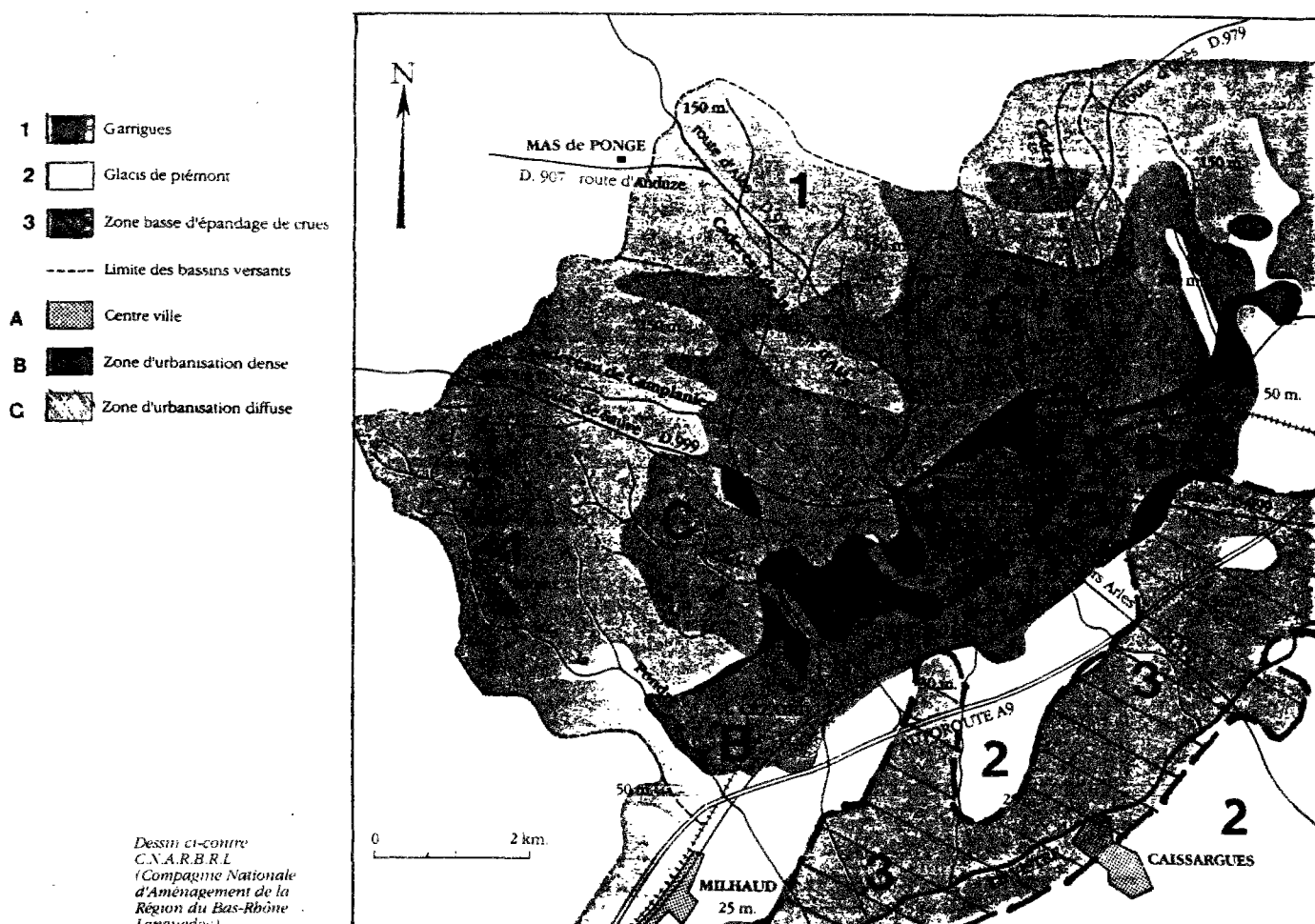


Figure 82 : Nîmes, contexte naturel et urbanisation
Limites des bassins-versants, extrait (47) ,p.10

1. Fiche descriptive (figure 82)

a- Les données

- SITUATION : Contrefort des Cévennes, et delta du Rhône dans l'arc méditerranéen. Ville entourée d'un hémicycle de collines.
- Surface du bassin-versant : 45 km²
- Orage de fin d'été, avec des nuages de type cumulo-nimbus.
- Total des chutes de pluie : entre 263 mm et plus de 420 mm.
- Durée de l'orage : 6/7 heures.
- Montée des eaux : 4 heures.
- Décrue : 3 heures.
- Hauteur de la lame d'eau : 1 mètre à 2 mètres intra-muros.
- Début de l'inondation : 7 heures du matin.
- Durée de la stagnation des eaux dans la ville : 6 jours à cause des exutoires naturels obstrués.
- Période de retour : estimations comprises entre 100 ans, 250 ans et 400 ans.
- La force du courant : 4 m/s pour le rapport PONTON.
7 à 11 m/s pour l'étude MERLIN.

b- Les dégâts

- Perte de vies humaines : neuf morts, dix blessés, plus deux morts dans les jours suivants de FR3, leur hélicoptère ayant heurté un câble de haute tension EDF.

- 4 milliards de Francs de dégâts matériels :
 - 30 logements détruits,
 - 45 000 personnes sinistrées,
 - 1 650 voitures détruites.

DESTRUCTIONS DANS LE SECTEUR PUBLIC :

- destruction du réseau d'eau potable : 50 % de la ville sans eau pendant quatre jours - sept kilomètres de réseau détruit.
- ennoïement de la station de pompage, qui n'a pas de toute façon "l'énergie" pour fonctionner.
- destruction du réseau d'égout sur 30 kilomètres.
- ennoïement de la station d'épuration.
- destruction de l'éclairage public sur 6 kilomètres.
- transport en commun : ennoïement de 50 autobus.
- destruction de voirie sur 25 kilomètres de voies.
- écoles : 41 écoles sinistrées.
- espaces verts : un tiers des espaces verts urbains saccagés.
- cimetière : destruction de murs et tombes.
- santé : un C.H.R. sinistré, destruction des scanners et laboratoires situés au sous-sol.
- état-Civil : ennoïement des archives de l'Etat Civil.
- EDF-GDF : destruction de poteaux électriques,
40 000 foyers sans électricité pendant un jour,
143 fuites de gaz.
- PTT : central ennoyé, et 65 000 lignes coupées.
- SNCF : les voies ferroviaires endommagées.

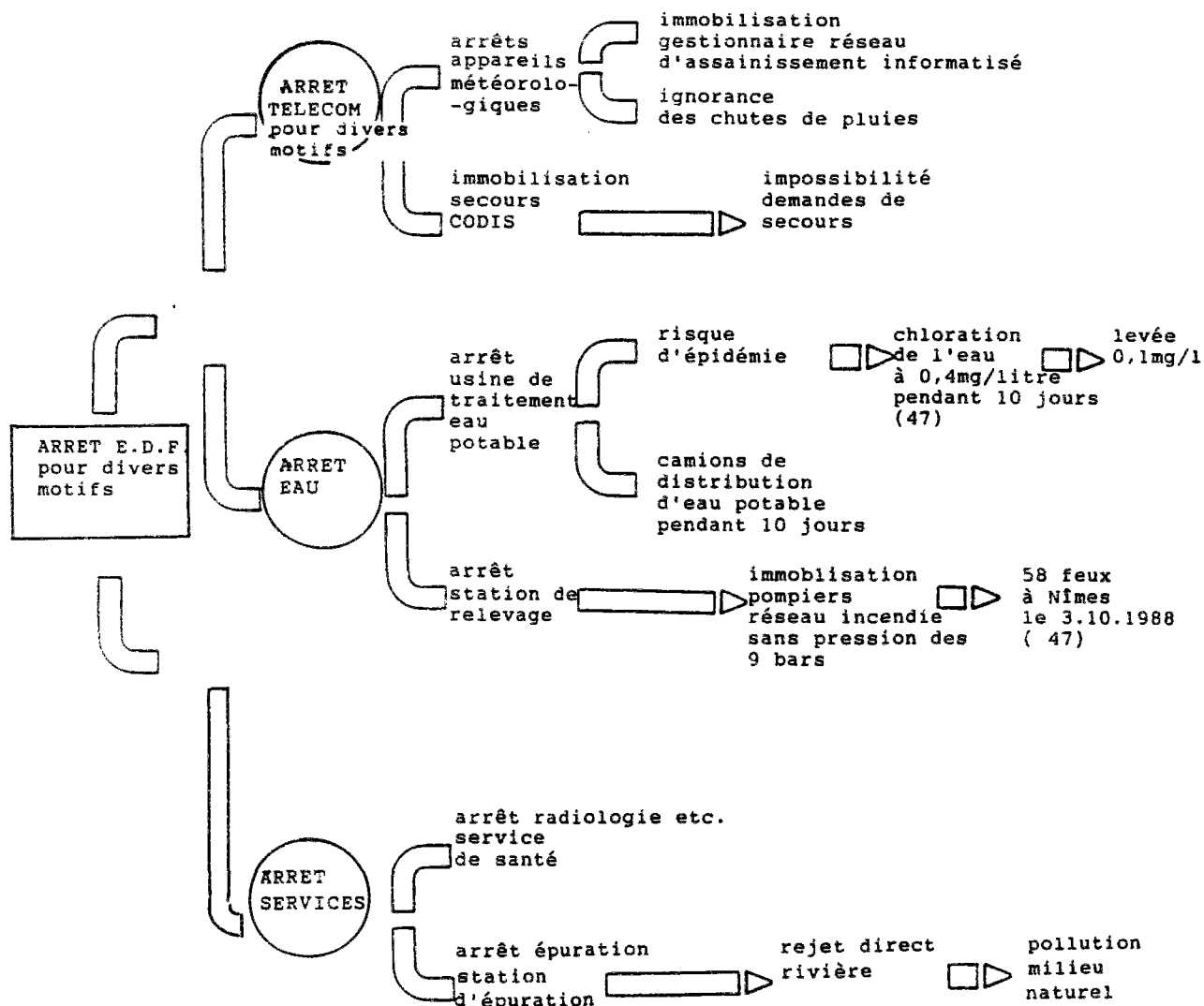


Figure 83 : Répercussions des coupures E.D.F. sur les autres activités

c- Les coûts non comptabilisés : les dégâts mineurs

Pour un service EDF (sous-groupe Cévennes), le coût supplémentaire non comptabilisé s'est élevé à 1300000 Francs (valeur 1989).

Il comprend le déblaiement des boues des postes, la remise en état du petit matériel et des voitures d'intervention, les pompes des sous-sols, etc.

N'est pas comptabilisée du tout L'AVARIE de la ligne Haute Tension due au choc de l'hélicoptère de FR3, la destruction des clôtures,...

Si un seul bâtiment de gestion EDF relève un coût parallèle de ce montant là, constitué par des dégâts mineurs, le coût réel du sinistre sur l'ensemble des bâtiments publics et communaux (non assurés d'ailleurs) a dû être beaucoup plus important que le coût global annoncé, et méritait d'être mieux connu.

2. La catastrophe

La catastrophe dure sept heures pendant lesquelles les voiries d'amont d'accès à la ville en provenance des collines vont se transformer en torrents de 0,50 à 1,00 mètre de hauteur.

Les deux principaux flots (cadereaux d'Alès et de Camplanier à l'ouest et le Cadereau d'Uzès à l'est) vont traverser la ville, en ennoyant tous les secteurs, et en emportant les véhicules.

Puis les eaux se trouveront piégées pendant six jours, en partie basse de la ville, par des obstacles (constructions ferroviaire et routière).

3. Le comportement des individus

A l'opposé du Grand-Bornand, le comportement des individus à Nîmes a été exemplaire pendant la crise :

- Comportement individuel :
Les scolaires sont conviés à venir se réfugier chez les gens, quant l'eau commence à monter (à 15 cm).

- Comportement collectif :
Des secours ponctuels s'organisent autour des casernes, des postes EDF ... avec des sorties de proximité, un nombre important de personnes, sur des refuges de fortune (grilles, arbres, fenêtres,...) sont sauvées.

Le sous-groupe EDF boulevard Talabot recueille environ 200 personnes, dont des nourrissons, et les nourrit pendant 24 heures.

Ce sauvetage de proximité n'a été possible que grâce à la présence de gros engins de chantiers EDF situés en centre-ville et qui ont leur plate-forme à 2,00 mètres de hauteur (situation similaire pour les casernements situés en centre-ville et la présence d'engins militaires).

4. Les défaillances des réseaux divers (tableau 83)

Tous les réseaux sont interrompus dès le début de la crise : téléphone, électricité, eau potable. La ville a été privée d'électricité soit un jour, soit plusieurs jours.

Les conséquences de ces coupures d'énergie ont surpris :

- paralysie d'une ville de 250 000 habitants,
- interruption du téléphone et des demandes de secours,
- interruption de la distribution d'eau potable,
- interruption des appareils de santé (hôpital),
- interruption de la météorologie, appareils de mesures et informations,
- isolement de la Préfecture et des Services de Secours,
- ennoiment des aires de stationnement des pompiers.

L'ennoiment de l'état civil a aussi beaucoup surpris par ses conséquences, car le renouvellement d'une carte d'identité a dû se faire sur le témoignage de deux personnes.

5. Histoire du poste émetteur EDF

Dès le début de la crise (8h), toutes les liaisons téléphoniques du sous-groupe EDF Bl. Talabot sont interrompues. Ne marchent plus : le réseau Télécom (réseau RTC), le téléphone du réseau téléphonique national d'EDF (réseau RTN) qui passe par les câbles Haute Tension et enfin le réseau Hertzien.

L'isolement n'est rompu que grâce à l'existence d'un ancien poste émetteur, retrouvé dans les caves, et à la présence d'un technicien radio qui mettra deux heures à contacter un Codis d'une ville voisine pour demander du secours pour un blessé, ne connaissant aucun "numéro" (fréquence) de Codis autre que celui de Nîmes ennoyé.

$\frac{T}{t}$	5	10	25	50	100
1 minute	2,9	3,5	4,2	4,7	5,2
5 minutes	11,2	12,5	14,0	15,2	16,3
10 minutes	16,6	19,0	22,1	24,4	26,6
15 minutes	20,5	24,0	28,6	32,0	35,6
30 minutes	25,8	32,2	40,5	46,5	52,7
1 heure	27,9	38,2	51,2	61,0	70,1
2 heures	31,1	42,2	57,2	68,4	79,5
3 heures	33,0	44,6	59,1	70,0	81,2
24 heures	43,0	60,0	81,3	96,9	113,0

PARIS - MONTSOURIS

Maximum annuel du débit des précipitations dans l'intervalle de temps t .

Estimation des valeurs (en mm et dixièmes) correspondant aux durées

moyennes de retour T (en années)

Durée de la pluie	hauteur de la pluie	risque
si la pluie dure 30 minutes	pour 46,6mm d'eau	on obtient un risque d'occurrence de 50 ans
si la pluie dure 45 minutes	pour 46,6mm d'eau	on obtient un risque d'occurrence de 25 ans

Figure 84 : Catastrophe de Paris

Estimation de la période de retour en fonction de la hauteur de pluie pendant les durées étudiées (station météorologique de Montsouris)

2.2.1.3. CATASTROPHE DE PARIS ET DE LA SEINE-SAINT-DENIS 27 JUIN 1990
--

Documents : Pas de rapport officiel
Articles de presse
Vécu personnel de l'événement

Cette catastrophe est connue surtout par le nombre de poissons morts dans la Seine.

1. Fiche descriptive

a- Les données

- **SITUATION :** Bassin Parisien
- **CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES :**
Orages d'été, avec nuage de type cumulo-nimbus d'une hauteur de onze kilomètres, chapeauté de cristaux de glace, à soixante mètres du sol pour sa base, le haut du cumulo-nimbus atteignant la troposphère.
- **CONDITIONS MORPHOLOGIQUES :**
Grande vulnérabilité du département de la Seine-Saint-Denis au ruissellement, à cause de sa configuration géomorphologique (le département est un ancien marécage) et de la densité de sa population (1 400 000 hab.) entraînant l'imperméabilisation du département.
- **CARACTÉRISTIQUES DE L'INONDATION :**
 - total des chutes de pluies :

Montsouris : 32,6 mm	Neuilly : 30,00 mm
Hôpital Salpêtrière : 44,7 mm	Pantin : 46,6 mm
Passy : 20,4 mm	
 - durée de l'inondation : 15h30 à 16h15 soit 45 minutes (figure 84)
 - débit de crue évalué : inconnu.
 - période de retour : estimation météorologie nationale Station Montsouris : risque d'occurrence cinquantennal (50 ans) pour Aulnay-sous-Bois (Seine Saint Denis) et risque d'occurrence de 25 ans pour la Salpêtrière à Paris.

La quantité de pluie tombée le 27 juin 1990 n'a pas été la plus importante historiquement (95,7 mm en 10 heures le 24 août 1987 à la station de Montsouris-Paris, sans conséquence, ni dégât). (figure 84).

Le jour de la catastrophe se trouvait aussi en période de sécheresse.

Débit pluviométrique : janvier-mai 1990 : 184,6 mm,
janvier-mai normal : 248,5 mm.

- le ruissellement a été quasi immédiat : 5 à 10 minutes après le début des pluies et il s'est tari aussi rapidement 10 minutes après l'arrêt des pluies.

b- Les dégâts

- pas de morts.
- inondations des rues de la capitale sur 0,20 mètre au centre, et 1,50 mètre à Aulnay-sous-Bois.
- dégâts : non chiffrés.
- immobilisation totale de la circulation automobile dans toute la capitale pendant six heures (16 heures/22 heures).
- inondation des voies sur berges, alors que la Seine est à son niveau bas (figure 85).
- inondations de transports en commun de la capitale : métro (lignes 3, 4, 8, 9 et 12 puis 5 et 10, l'eau arrivant sur les quais par les escaliers) et RER (ligne C, avec une inondation à Sevran).
- coupures d'électricité, les transformateurs souterrains (2000) se trouvant inondés par les eaux de ruissellement qui sont arrivées en prenant les accès.

c- Les conséquences en chaîne

- Origine de L'EMBOUTEILLAGE général de Paris : ennoïement du central des "FEUX TRICOLORES" sous la Bastille.
Conséquences : immobilisation de la capitale pendant six heures, ambulances comprises, ainsi que les voitures de pompiers.
- Origines de l'arrêt des transports en commun à Paris :
 - ennoïement physique des quais du métro dans plusieurs stations,
 - ennoïement du Central du réseau RATP (métro) se trouvant en souterrain à la Bastille. Les circuits électriques sophistiqués d'aiguillage, de sécurité sont déboussolés par l'eau. Les conducteurs des rames s'arrêtent ne pouvant naviguer à vue et dans l'eau.
- Deux cas d'inondations du métro :
 - certaines stations, situées sous la Seine, sont inondées jusqu'aux quais,
 - d'autres stations, ont d'abord les quais submergés par le ruissellement des rues puis le ballast avec le rail d'alimentation électrique.
- Conséquences des coupures d'électricité :
 - cinq hôpitaux sans électricité, ce qui fait dire à certains médecins qu'on se trouve en situation "criminelle",
 - quatre arrondissements privés d'électricité (11°, 12°, 19° et 20°) sur le trajet du cumulo-nimbus, ainsi que la ville de Pantin sur 24 heures.
- Refoulements des boucles d'égouts (avec projection de tampons) et des bouches de téléphone sur soixante centimètres de hauteur.
- A Pantin, les gens se sont réfugiés sur les tables des cafés.
- Conséquences de cette inondation : pollution de la Seine avec 80 tonnes de poissons détruits, et CONSTAT OFFICIEL DE LA POLLUTION DU RUISSELLEMENT DES EAUX PLUVIALES URBAINES.

2. La catastrophe de Paris

La catastrophe n'a duré que 30 à 45 minutes mais a immobilisé totalement l'activité de la capitale sur 12 heures, et a détruit la faune de la Seine entre Saint-Cloud et Mantes-la-Jolie, avec 80 tonnes de poissons morts, flottants sur l'eau.

Il y a eu donc deux catastrophes :

- une catastrophe par ruissellement,
- une catastrophe écologique de la faune aquatique.

3. La catastrophe de la Seine-Saint-Denis

a- Gestion informatisée HADES :

Le département a mis au point une gestion informatisée et centralisée, appelée HADES (annexe 1 page 606) composée d'une équipe de 250 personnes ; le central situé à Rosny, gère le réseau d'assainissement (figure 86).

Mais le système HADES n'a pas fonctionné pendant la crue de 1990 car, selon les responsables "il est tombé trop d'eau en trop peu de temps".

b- Fonctionnement des bassins de rétention

• GESTION EFFICACE MAIS PARTIELLE DE BASSINS DE RÉTENTION :

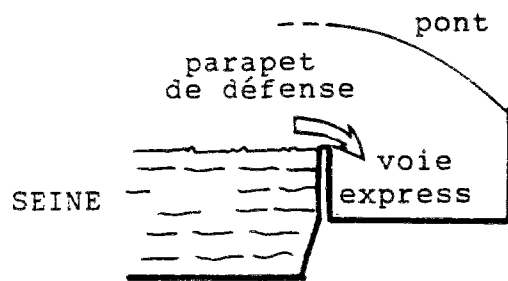
Un certain nombre de bassins de rétention ont fonctionné pendant la crue du 27 juin 1990 mais à raison du tiers (1/3) ou du quart (1/4) des possibilités de rétention.

- le bassin de rétention **Maurice AUDIN** (par surverse) : remplissage sur 2 mètres de hauteur soit une rétention de 10 000 m³ pour une possibilité de stockage de 25 000 m³ (annexe 1 pp. 562 à 564).
- le bassin de **Sévigné** (par surverse) : marnage possible de 1 mètre de hauteur soit 10 000 m³ de stockage possible, le plan d'eau contenant déjà à demeure 20 000 m³, le marnage a dû être de quelques dizaines de centimètres pendant la crue du 27 juin 1990 (soit sur 0,20 par exemple 2 000 m³) (annexe 1 pp. 565 à 567).
- le bassin de **Savigny** du Parc du Sausset (par surverse) : le niveau du plan d'eau est monté de 1 mètre soit une rétention de 40 000 m³ sur 75 000 m³ (annexe 1 pp. 580 à 584).
- le bassin du **Loup** : niveau de la crue à plus de 2 mètres, rétention de 10 000 m³ sur les 40 000 m³ possibles (annexe 1 pp. 575 à 579).
- le bassin du **Blanc-Mesnil** : stockage du 27 juin 1990 de 100 000 m³ (traces de laisses) soit 1/3 des possibilités de stockage évaluées à 300 000 m³.

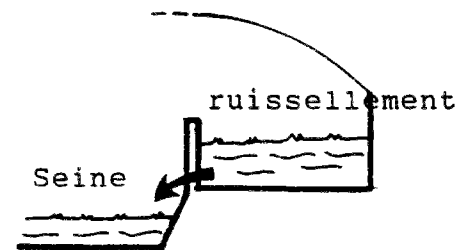
• GESTION INEFFICACE DE BASSINS DE RÉTENTION

Un certain nombre de bassins de rétention n'ont pas fonctionné pendant la crue. On n'a pas trouvé de laisses de crue et ils n'ont pas été vu en eau :

- le bassin de rétention de la **Fosse Maussoin** (annexe 1 pp. 548 à 561) ;
- le bassin des **Mousseaux** : aucun écrêtement pendant la catastrophe alors qu'il peut écrêter 2 000 m³ (annexe 1 pp. 570-571) ;



a- crue fluviale
prévision d'ennoiement
des berges de la Seine



b- crue pluviale du 27.6.1990
ennoiement des voies
express par ruissellement

Figure 85-Inondation de la voie express
à Paris le 27.6.90 alors que
la Seine est à son niveau bas.

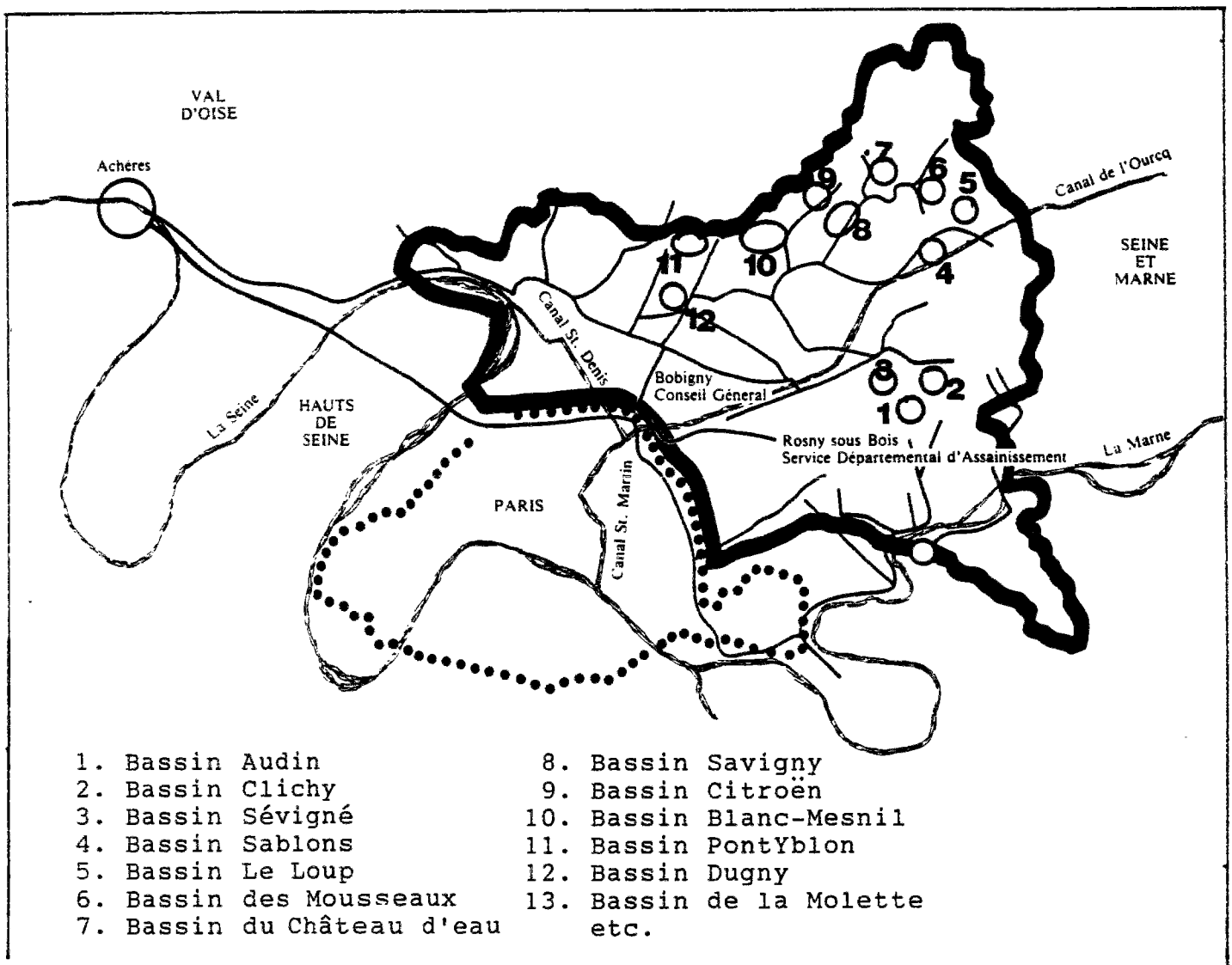


Figure 86- Service Départemental d'Assainissement
de la Seine-Saint-Denis.
Positionnement des bassins de rétention étudiés

- le bassin du lotissement de **Château d'eau** dysfonctionnement à cause de la construction d'ouvrages sauvages de court-circuitage de la rétention (annexe 1 pp. 572 à 575) ;
- le bassin **Blanc-Mesnil** : la partie engazonnée ne semble pas avoir été inondée (pas de traces de laisses) (annexe 1 pp. 586 à 593) ;
- dans d'autres départements nous avons aussi remarqué que le bassin de rétention de la **Hay-les-Roses** (Paris-Sud) n'a pas été vu en eau, et n'a eu aucune trace de boue.

4. La détection de l'événement et la prévention à Paris

La station météorologique de Montsouris (Paris) n'a pas reçu de B.M.S. pour le 27 juin (aucune inscription sur les registres le 28 juin). La station Alma (station émettrice nationale à l'époque, centre qui est maintenant à Toulouse) a affirmé avoir émis trois B.M.S. ce jour-là "B.M.S. d'orages avec vents". Par contre, une autre station météorologique du sud de Paris (aéroport de Brétigny) a reçu UN SEUL bulletin "B.M.S." du service central ce jour-là, le matin et un "B.M.S. VENTS" exclusivement.

• Dysfonctionnement des circuits de transmission au sein même de la météorologie nationale le 27 juin 1990.

Les transmissions météorologiques ont donc été interrompues entre Alma et Montsouris le jour de la catastrophe. Les messages transitant par le réseau PTT (réseau Transpac) ont-ils été envoyés ou foudroyés sur Paris ? Et les transmissions par liaison satellitaire ont aussi été coupées ce jour précisément.

Cette remarque de non transmission des B.M.S. amène donc à réfléchir, par quels phénomènes les B.M.S. sont bloqués : câbles mouillés ? ou bien système de transmission foudroyé ?

• ALERTE ET PRÉVENTION

Il n'y a donc pas eu d'alerte sur Paris le 27 juin 1990 (météo, Préfecture, Codis, DDE, pompiers, etc...). Pourtant, un B.M.S. émis ne peut passer inaperçu dans une station météorologique, car il y a une SONNERIE qui sonne pour chaque bulletin jusqu'à ce que quelqu'un accuse réception (interview Montsouris).

• LA SOUS-ESTIMATION DE L'ARRIVÉE DE LA CATASTROPHE

Emission d'un B.M.S. le 26 juin (un jour avant la catastrophe) à 6h20 UTC (heure réelle) valable pour 24 heures (B.M.S. d'orages n° 168) signalant des orages remontant de la Vendée vers l'Ile-de-France, en l'épargnant progressivement ... ce qui n'a pas été le cas (figure 87).

Le texte n'était pas alarmiste : ni alerte, ni alarme. Cette recherche détaillée sur le parcours des B.M.S. démontre que la chaîne globale doit être vérifiée au niveau des possibilités d'envoi et de foudroiement, et qu'un maillon manquant bloque la prévention.

5. Les réactions de la presse

Les réactions dans la presse ont été importantes, exprimant un étonnement des conséquences d'un risque naturel tel que le ruissellement, INCONNU à Paris, le premier risque donc historique de ruissellement.

6. "Leçon" de la catastrophe du 27 juin 1990

C'est à partir de cet événement que les eaux pluviales ont été considérées comme "polluées" alors que jusqu'ici les eaux pluviales des "réseaux séparatifs" d'assainissement étaient considérées comme propres, pouvant donc être rejetées en rivière sans traitement.

Origine des pollutions :

- pollution du ruissellement par le lavage des voies,
- pollution de la Seine par les délestages des déversoirs d'orages des réseaux unitaires.

06:18:46 PF92

ZCZC

BMS D'ORAGE NUMERO 168

ORIGINE : PARIS/MONTSOURIS

DATE : 26/06/90

HEURE : 0620 UTC

VALIDITE : 24 HEURES

.... SUR ILE-DE-FRANCE

TEXTE :

LES ORAGES QUI SE DEVELOPPENT ACTUELLEMENT DE LA VENDEE A LA GIRONDE VONT REMONTER VERS LE CENTRE EN MATINEE PUIS ILE-DE-FRANCE EN DEBUT D'APRES-MIDI. LEUR INTENSITE RESTERA MODEREE EN MATINEE MAIS CETTE APRES-MIDI ET EN SOIREE, ILS SERONT PARFOIS FORTS ET POURRONT ETRE ACCOMPAGNES DE GRELE ET DE FORTES RAFALES DE VENT.

LA ZONE ORAGEUSE SE DECALERA PROGRESSIVEMENT VERS L'EST EN COURS DE NUIT EPARGNANT PEU A PEU NOTRE REGION.

FIN=

NNNN

Figure : 87 : B.M.S. du 26.6.1990 reçu à Montsouris.

Le risque est non détecté (document station météorologique de Montsouris)

Il faut tout de même noter que les rejets des égouts de Saint-Cloud sont encore, en 1993, directement rejetés dans la Seine, les travaux de raccordement avec la station d'épuration d'Achères n'étant pas encore achevés.

Il faut aussi noter que de nombreux DELESTAGES sans traitement ont eu lieu le 27 juin 1990 à Achères, pour éviter l'engorgement de la station d'épuration.

7. Le comportement des personnes

- INCOHÉRENCE :

- des personnes sont "montées" sur les tables des cafés, sans réaliser que l'eau aurait pu monter plus haut ;
- des personnes se sont réfugiées dans les bouches de métro, en descendant avec le ruissellement, et se sont donc retrouvées les pieds dans l'eau sur les quais ;
- les personnels de gestion des réseaux divers souterrains EDF, TELECOM, RATP n'ont pas compris aussi d'où pouvait venir toute cette eau, qui a accédé aux postes clefs souterrains par les bouches d'aération, les trappes de visites, les regards d'accès au niveau du sol, etc ;
- il n'y a eu aucune gestion du risque par les services de secours, en particulier par les pompiers immobilisés dans l'embouteillage géant. Et pour faire la circulation les agents sont venus à vélo, à chacun des principaux carrefours.

8. Les défaillances de matériel

La DDE de la Seine-Saint-Denis, foudroyée la veille dans la nuit du 26 juin, n'a pas pu fournir :

- les données météorologiques,
- les données pluviométriques.

Elle n'a reçu aucun bulletin B.M.S. le jour de la catastrophe.

9. La gestion du réseau pendant la crise

Seuls les bassins de rétention à gestion mécanique automatique ont fonctionné. Aucune gestion informatisée n'a fonctionné. Les techniciens du système informatisé HADES, ont dû gérer la crise SANS information, avec une conduite à l'aveuglette basée sur l'expérience.

10. Indemnisations

Paris et le département de la Seine-Saint-Denis n'ayant pas été déclarés pour la crue du 27 juin 1990 "catastrophe naturelle", il n'y a pas eu d'indemnisations pour les sinistrés en fonction de la loi.

<p>2.2.1.4. LA CATASTROPHE DE VAISON-LA-ROMAINE 22 SEPTEMBRE 1992</p>

Document : Rapport du Conseil Général des Ponts et Chaussées
novembre 1992 Rapport BOURGES [4]
Articles de presse
Conférence ITPTB sur la crue de l'Ouvèze de 1992
Rapport de Saint-Seine [41]
Interviews : école, commerçants, facteur, Monuments
Historiques

1. Fiche descriptive (figure 88)

a- Les données

• **SITUATION** : Ville située à un verrou naturel, à la limite de la montagne et de la plaine, et sur le lieu de passage de l'écoulement des eaux des vallées des Préalpes du Sud (dénivellé de 600 mètres à 1 912 mètres dont une partie du Mont Ventoux).

• **CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES** : Orages de type Cévenol, de fin d'été, formés par la collusion d'un front froid et d'un front chaud venant du Sud.

- Nuages de type cumulo-nimbus.

- Sol saturé le 21 septembre : 200 mm de pluies, les sols sont engorgés, catastrophe le 22 septembre : durée de l'orage entre 5 heures du matin et 11 heures soit 6 heures.

• **CONDITIONS MORPHOLOGIQUES** : Surface du bassin-versant et des sous-bassins de Vaison :

60 km x 20 km = 1 200 km²

L'ensemble des bassins-versants situé à l'amont de Vaison est beaucoup plus important.

• **CARACTÉRISTIQUES DE L'INONDATION** : Inondation fluviale par débordement de rivière et inondation pluviale par ruissellement sur les pentes.

Total des chutes de pluie (figure 89) :

- 150 mm à 250 mm sur l'ensemble du bassin,

- 300 mm à Entrevaux situé à 6 km en amont de Vaison.

Durée de l'inondation :

- de 13h30 à 16 h30 soit 3 heures,

- montée de eaux : 13h30,

- paroxysme submersion du Pont Romain : 15h40,

- décrue : 16h30.

Effet tampon ou effet retard dû au milieu naturel :

- l'inondation a commencé 2h30 après l'arrêt des pluies.

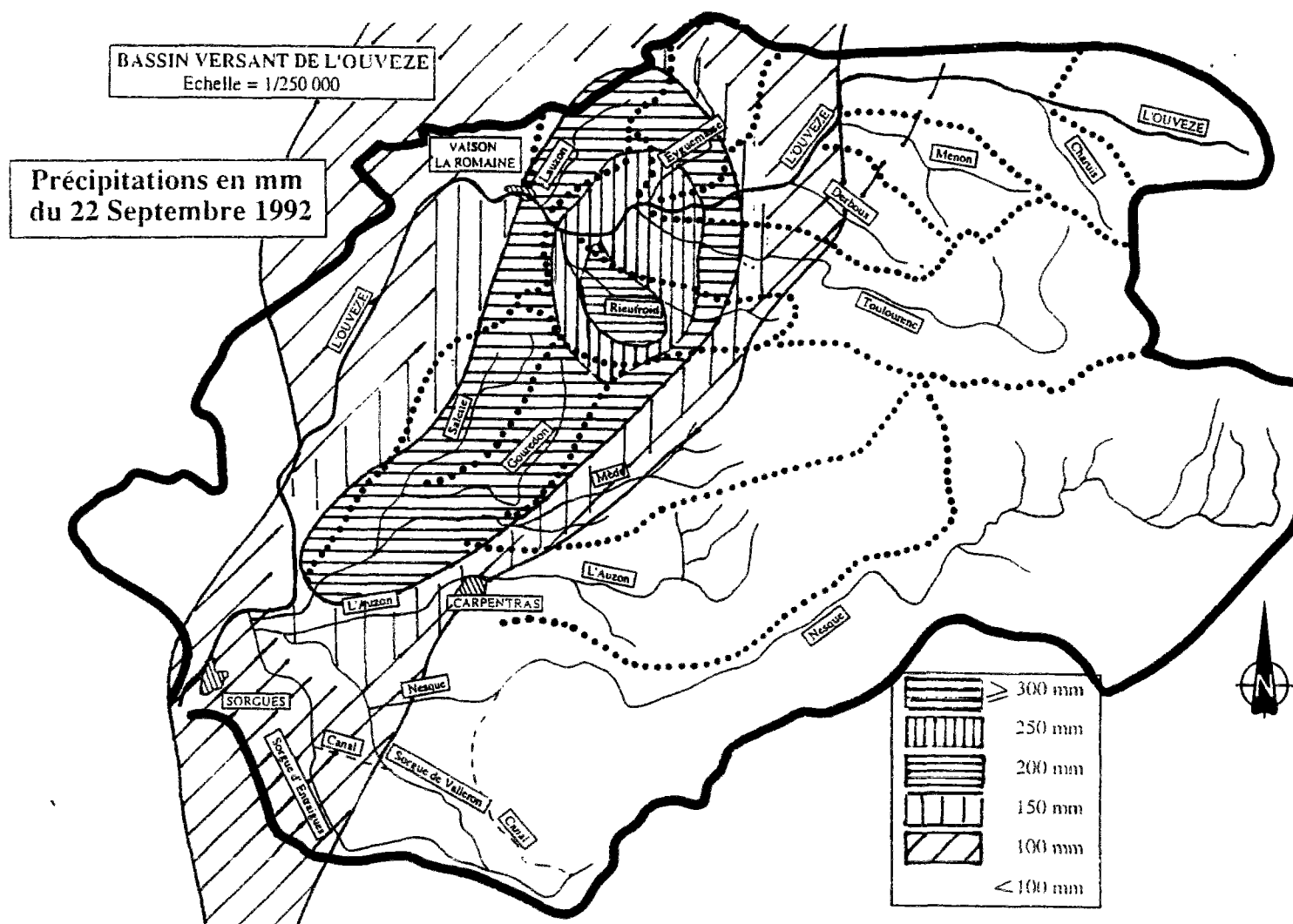


Figure 89 - Courbes des isohyètes
(1809 égal, 1809 forte pluie)
hauteur totale des précipitations
du 21 et 22 septembre 1992
(extrait du rapport de J. de Saint-Seine,
CETE Méditerranée (41)).

Hauteur de la lame d'eau :

- inondation fluviale : 6,80 m au pont,
- inondation pluviale dans les rues : 0,40 m place de la Poste.

Débit de crue (estimation au Pont Romain) :

- 1 100 m³/s : rapport BOURGES,
- 1 000 m³/s à 1 500 m³/s : CÉTÉ Méditerranée,
- 650 m³/s : DDE du Vaucluse.

Estimation de la période de retour :

- crue de 400 ans (CÉTÉ Méditerranée),
- crue de plus de 200 ans (DDE Vaucluse).

Création d'un EXHAUSSEMENT du niveau des eaux, sans doute à cause de l'étroitesse de l'arche du Pont Romain et remontées des eaux vers le camping municipal (cf. étude de Saint-Seine [41]).

Prévision météorologique :

- bulletin météorologique spécial (B.M.S.) d'alerte 24 heures avant, qui a été enregistré sur répondeur à la mairie pendant le week-end ;
- envoi d'un B.M.S. d'alarme 12 heures avant la catastrophe prévoyant des pluies de 300 mm.

• CARACTÉRISTIQUES ANTHROPIQUES (photos 90,91,92):

- construction de lotissements depuis 1980 sur terrains inondables,
- implantation de la zone des écoles sur terrains inondables,
- implantation du camping municipal sur terrain inondable,
- implantation de la zone active (grande surface, etc...) sur terrains inondables,
- remodelage de la rivière depuis 20 ans : recalibrage et rectification du lit, avec suppression des méandres à l'amont de Vaison.

• L'INONDATION PAR RUISSELLEMENT DE VAISON-LA-ROMAINE (partie la Romaine)

Nous avons noté les facteurs suivants pour la crue de ruissellement direct sur la ville avant l'arrivée des eaux dans l'Ouvèze, pendant la catastrophe du 22 septembre 1992 :

- l'enfouissement des ruisseaux péri-urbains et urbains,
- le refoulement du réseau d'égouts en partie haute de la ville,
- des embâcles sur la rocade composées de 400 voitures détruites (la rocade étant située entre 10,00 m et 30,00 m au-dessus du niveau des plus hautes eaux de l'Ouvèze),
- l'inondation de tous les rez-de-chaussée en ville sur 0,15 à 0,20 mètre de hauteur,
- des problèmes ponctuels d'enneigement de certaines rues,
- enfin, la présence récente de vignobles à l'amont de la ville sur le versant de l'Adret.

b- Les dégâts des deux inondations

- 40 morts pour le Vaucluse dont 12 morts au camping de Vaison-la-Romaine (rapport BOURGES),
- OU 47 morts pour M. Paul MAISTRE (BCEOM),
- OU 32 morts pour Vaison-la-Romaine (Science et Vie),
- OU beaucoup plus de morts pour certains riverains, en fonction du nombre de cercueils commandés,
- OU 46 morts et 7 disparus (dépêche AFP 7 décembre 1992).



Photo 90-
Lit majeur de l'Ouvèze
à l'amont du pont
Romain .

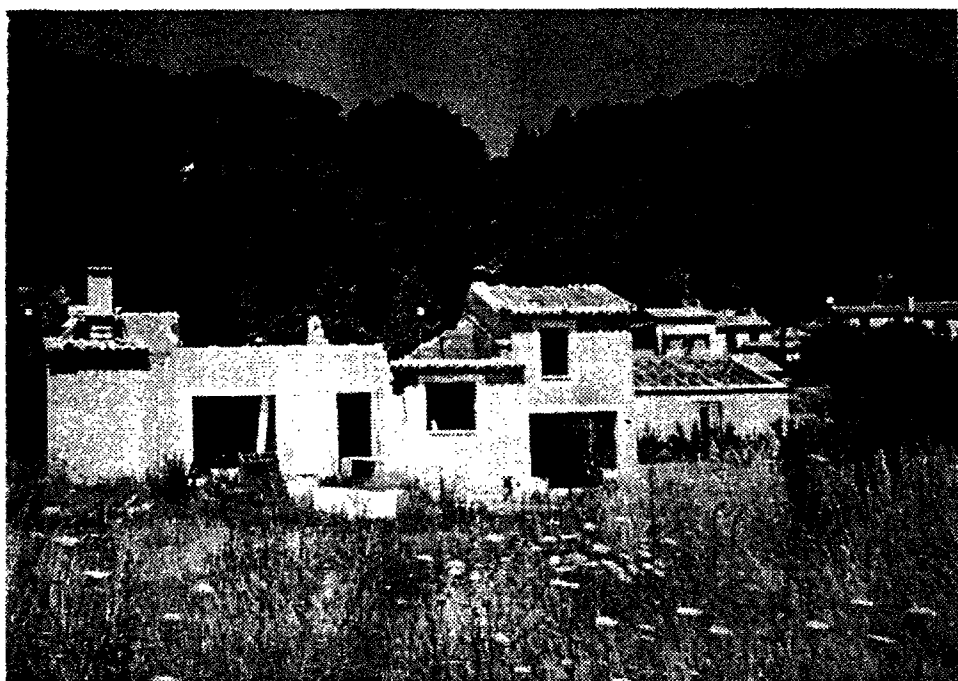


Photo 91-
Lotissement Théos
prise de vue juillet 93



Photo 92-
zone des écoles dans
le lit majeur de
l'Ouvèze.

- 50 maisons détruites,
- 700 déclarations de sinistrés,
- dommages aux ouvrages routiers et réseaux :
ponts départementaux.

1/3 du patrimoine détruit, 115 ouvrages touchés sur un total de 313 (ouvrages en ruine, ou désordres de structure : maçonnerie, superstructure, désordres d'affouillement des piles, du fond du radier de la rivière, des remblais d'ancrage, ...).

Pour l'ensemble des ponts (départementaux et communaux) c'est 70 % du patrimoine qui est atteint selon M. Didier JAEGLER de la DDE du Vaucluse.

- immersion de la zone des écoles et destruction d'une maternelle,
- immersion des ruines archéologiques,
- immersion du central téléphonique de Vaison situé dans la zone des écoles.
- défaillances du fonctionnement des appareils de mesures : les trois limnigraphes ont été emportés.
- montant des dégâts : 2,8 milliards et 718 communes sinistrées (cf. Dépêche du 7 décembre 1992 AFP).

c- Les crues historiques

Crue du 21 août 1616, citée dans les guides touristiques actuels:

- 80 maisons détruites en 1616 mais sans doute construites avec des matériaux autres que les matériaux actuels, en particulier des habitations en ossatures en bois avec remplissage en pisé⁽¹⁾, torchis⁽²⁾ ou plâtre),
- 1 800 personnes noyées (selon M. Didier JAEGLER).

Autres crues :

- octobre 1886 : débit de 800 m³/s,
- novembre 1907 : débit de 1 000 m³/s.
(cf. l'ouvrage de Maurice PARDE, Géographe et Hydrologue "Le régime du Rhône, 2ème partie la genèse des crues" Université de Lyon 1925).
- crue de 1986 : événement avant-coureur : 3 morts.

(1)Pisé : Maçonnerie de terre argileuse battue et façonnée sur place. Cette technique fut beaucoup employée dans les constructions rurales

(2)Torchis : Mortier composé de terre grasse et de paille hachée

Département de la HAUTE-LOIRE



1- zone du ruissellement 2-lieu d'alerte 3-zone d'inondation

Figure 93 : Impact d'un ruissellement sur un bassin-versant (Mont-Mézenc) très éloigné du lieu de l'inondation (Brives-Charensac) (extrait de Concours de la Fondation de France 1989)

2.2.2. ♦ CATASTROPHES ANNEXES

Nous avons aussi retenu quelques catastrophes annexes pour mieux cerner la gamme des risques de ruissellement, de par leur répétition.

2.2.2.1. CATASTROPHE DE BRIVES-CHARENSAC DIMANCHE 21 SEPTEMBRE 1980
--

Documents : "Douce Loire", la crue du 21 septembre 1980 de Henriette BESSON, 1981 [2]

1. Fiche descriptive (figure 93)

Catastrophe à retardement avec un bassin-versant très éloigné à 50 km.

a- Les données

- **SITUATION :**

Ville de plaine, le long de la Loire en amont du Puy, à 50 km d'un important bassin-versant montagneux le Mont-Mézenc (Ardèche). La ville est protégée par un endiguement qui va être submergé le 21 septembre 1980.

- **CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES :**

"Une masse importante d'air chaud en provenance du Sahara est venue, après s'être humidifiée en traversant la Méditerranée, se heurter à une masse d'air froid nordique à hauteur des Cévennes" (figure 94).

La rencontre d'air chaud et d'air froid s'est produite sur la ligne de partage des eaux des bassins méditerranéen et atlantique à la hauteur du col de la Chavade en ayant une incidence directe sur la Loire et sur l'Allier, alors qu'habituellement ce fort contraste de masses d'air a lieu sur le versant méditerranéen.

- **CONDITIONS MORPHOLOGIQUES :**

Les pluies en tombant sur le versant atlantique produisent des écoulements qui mettent 5 heures pour atteindre Brives-Charensac et parcourir 50 kilomètres.

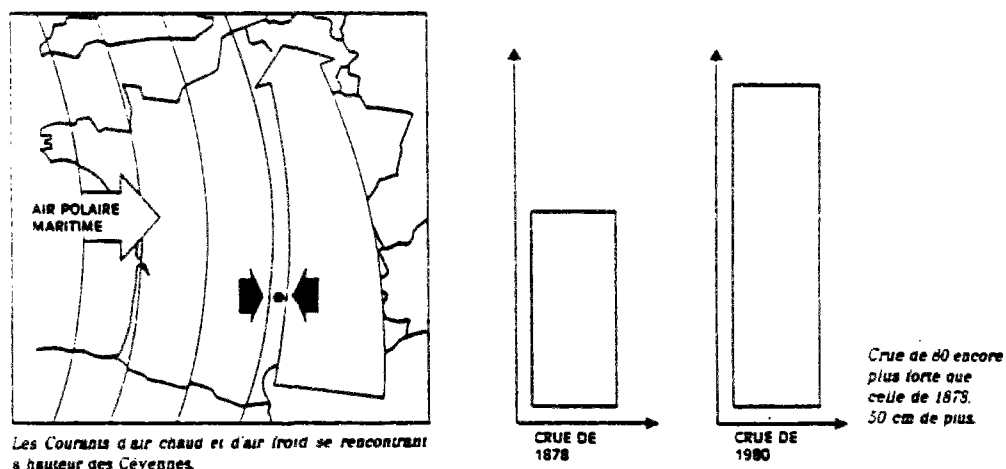


Figure 94 - Le déplacement des pluies cévennoles sur les bassins-versants atlantiques.
(extrait Concours de la Fondation de France 1989 ,prévention des risques naturels, commune de Brives-Charensac)

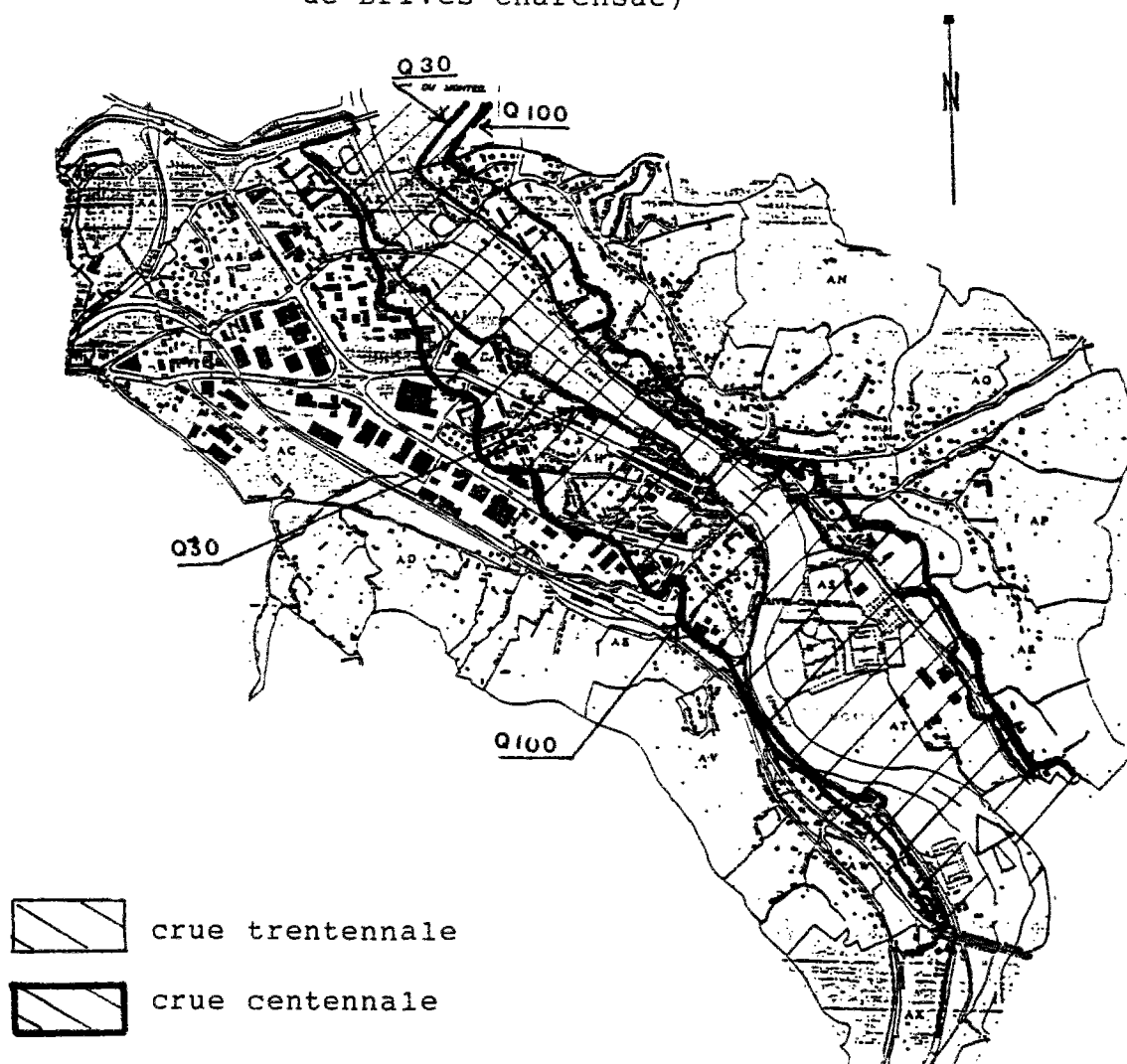


Figure 95 - Brives-Charensac , limite de la crue centennale et urbanisation (idem).

- CARACTÉRISTIQUES DE L'INONDATION :
 - total des chutes de pluie : 400 mm en 14 heures, tombées la veille le 20 septembre,
 - première crue à Goudet : 8 h 30,
 - durée de l'inondation : 12 h 30 à 16 heures soit 3,30 heures,
 - hauteur de l'eau en ville : 3 mètres en 1/2 heure.

- PLUIES HISTORIQUES :

Crue de 1878, qui a 50 cm de moins de hauteur de lame d'eau que la crue de 1980. Il serait intéressant de faire l'analyse de cette différence sur un siècle.

b- Les dégâts

- INONDATION DU CAMPING (figure 95)
- 8 morts dont 3 au camping municipal (15 blessés) :
- plusieurs centaines de voitures détruites,
 - des écoles en préfabriqués emportées,
 - destruction d'arche d'ancien pont,
 - rupture de l'eau potable et de l'électricité,
 - coût des dégâts : 350 millions de francs valeur 1981, se répartissant comme suit :

Entreprises concernées	Pertes d'emploi: 1 700 salariés	Dégâts : 175 millions
Commerces	60 sinistrés	20 millions
Artisans	100 sinistrés	23 millions
Agriculteurs	54 sinistrés	3 millions
Equipement public	(routes, ponts, réseaux,...)	70 millions
Privés	1000 dossiers de retenus sur 2000 demandes soit 50 % des sinistrés dédommagés	59 millions

c- Evolution de l'estimation des dégâts : enseignement

- en 1980, le coût des dégâts était estimé à 350 millions de francs,
- en 1989, l'estimation a été rectifiée. Le coût des dégâts réels est estimé à 420 millions (valeur 1982), soit 70 millions de plus (+ 20 %) au moment du Concours de la Fondation de France "Prévention des Risques Naturels", qui récompense l'effort de la commune dans sa gestion du risque.

d- Le P.E.R.I.

Le Plan d'Exposition au Risque Inondation de Brives-Charensac a été "publié" le 20 novembre 1989. Le délai est de cinq ans pour l'exécution des prescriptions. En 1993, un rappel de cette réglementation est confirmé par le Ministère de l'Environnement (D.R.M.).

La publication d'un PERI n'entraîne pas automatiquement des réalisations de protection sur le site, comme on peut le voir.

Mont Monseguise
935 m

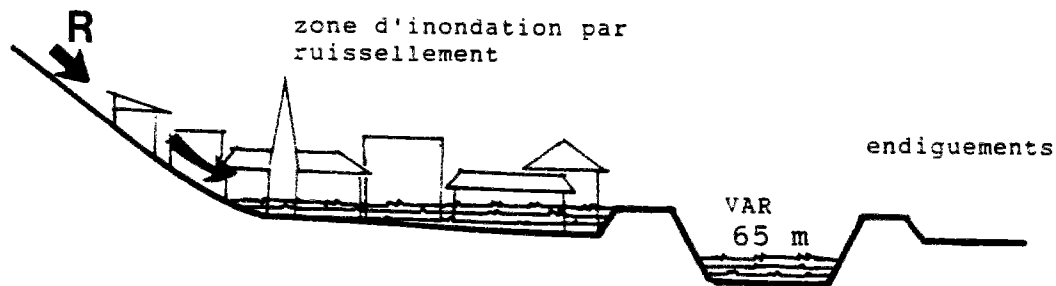


Figure 96 - Croquis sur l'inondation pluviale de Carros-Gattières (1981) où les endiguements du Var ont été pris à revers.

Aménagements du Var: 1969 construction de 10 seuils
1971-1975 construction de 7 seuils
1982 construction de 2 seuils

dommages 1982 - sapement des fondations de l'endiguement, glissement brutal du parement en béton

dommages 1981- rupture de l'endiguement pris à revers suite aux débordements des vallons.

2.2.2.2. LA CATASTROPHE DE CARROS-GATTIÈRES (Alpes Maritimes) - SEPTEMBRE 1981

Documents : Le PER de 1986 [34]

- **L'EVENEMENT**

En septembre 1981, un événement pluviométrique exceptionnel de fréquence CENTENNALE s'est abattu sur les communes de CARROS et de GATTIERES, transformant les talwegs en de véritables torrents d'eau et de boue qui ont dévasté la plaine du VAR.

L'endiguement du Var est pris à revers par le ruissellement en provenance des montagnes.

Les eaux sont piégées par ces digues, ne peuvent atteindre la rivière et inondent les habitations de la plaine, qui étaient sensées être protégées des inondations fluviales par la digue. L'inondation a lieu alors que le niveau de la rivière est au point bas (croquis 96).

- **LA MISE EN PLACE DU PLAN D'EXPOSITION AUX RISQUES NATURELS PRÉVISIBLES (LE P.E.R.) PROGRAMME 1984-1985**

L'analyse du P.E.R. (document 1985 règlement, pièce 3) n'offre aucune solution de prévention, de rétention ou de protection contre le ruissellement.

"Annexes techniques jointes au présent règlement" : nous notons les recommandations suivantes :

- pour les INONDATIONS = NEANT (article 4),
- "prévoir éventuellement le drainage comme parade de stabilisation". Cette solution n'est pas à notre avis à l'échelle des torrents d'eau qui ont dévalé dans des vallons.

2.2.2.3. LA CATASTROPHE DE BÉDARRIDES 22 SEPTEMBRE 1992

Documents : les mêmes que pour Vaison-la-Romaine

a- Les données

- **SITUATION** : Ville de plaine, située en contre-bas d'un endiguement centennal d'amont de l'Ouvèze.

b- Les dégâts

- 8 morts,
- rupture de l'endiguement d'amont de protection,
- la majorité du village est ennoyé pendant plusieurs jours,
- ennoisement des bâtiments des pompiers,
- hauteur de la crue : 1,50 mètre environ.



	milieu	début pluie	arrêt pluie	durée pluie	effet retard	début crue	début gestion crue	arrêt crue	durée crue	morts	morts campings
GRAND-BORNAND	naturel	17h30	20h00	2h30	1h *	18h30	18h45 (hasard)	20h30	2h	27	27
NIMES	peri- urbain	1h00	8h00	7h	6h (6km) *	7h00		14h00	7h	9+2	0
PARIS	urbain	16h00	17h00	1h	10mn *	16h10		17h10	1h	0	0
VAISON-LA- ROMAINE	naturel	5h00 (10h00)	11h00 12h30	6h 1h)	2h30 **	13h30		16h30	3h	40 vacluse	12
BRIVES- CHARENSAC	naturel	18h30 chute à 50 km à l'amont	8h30	14h	4h (50km) **	12h30	14h30	16h00	3h30	8	3/5

Figure 97 - Récapitulatif de grandes catastrophes
 * effet retard après le début des pluies
 ** effet retard après la fin des pluies

2.2.3. DESCRIPTION SYNTHÉTIQUE DES CATASTROPHES

En nous appuyant sur les exemples retenus de catastrophes majeures, et autres catastrophes consécutives au ruissellement, nous trouvons les caractéristiques suivantes (tableau 97).

2.2.3.1. La rapidité de l'événement : Catastrophe de ruissellement

La rapidité de la durée de la catastrophe surprend "tout le monde".

Durée des catastrophes :

- 1 heure pour Paris (16h00-17h00),
- 3 heures pour le Grand-Bornand (17h30-20h30),
- 3 heures pour Vaison-la-Romaine (13h30-16h30),
- 7 heures pour Nîmes (7h00-12h00), si l'on retire le problème du piégeage des eaux en partie basse de la ville par les barrières anthropiques (SNCF, routes, autoroutes).

Pour tous les cas, il ne s'écoule que quelques heures entre le début de l'inondation et la fin de l'inondation.

2.2.3.2. La vitesse du courant

C'est pour la catastrophe de Nîmes que la vitesse du courant du ruissellement urbain a été le mieux étudiée. D'après le rapport PONTON [39], la vitesse du courant intra-muros tournait autour de 4 m/s ; d'après le rapport MERLIN [24], la vitesse du courant a pu atteindre 11 m/s.

2.2.3.3. Des conséquences mortelles

Le nombre de décès pour les crues de ruissellement est bien plus élevé que pour les crues classiques de débordement de rivières en plaine :

- le Grand-Bornand : 27 morts,
- Nîmes : 9 morts + 2 morts,
- Paris : 0 morts,
- Vaison-la-Romaine⁽¹⁾ : 40 ou 47 morts dans le Vaucluse, 32 morts à Vaison même,
- Brives-Charensac⁽¹⁾ : 8 morts,
- Bédarrides : 8 morts.

⁽¹⁾ Inondation mixte : Débordement fluvial et crue pluviale de ruissellement

2.2.3.4. L'effet retard et l'effet tampon

a- L'effet retard⁽¹⁾

Suivant les catastrophes, nous avons constaté un "effet retard" entre le moment où les pluies commencent de tomber en formant un ruissellement, et le moment où la crue commence :

- Paris : crue 5 à 10 minutes de décalage entre le début de la pluie et le début de la crue.
- Brives-Charensac : les chutes étant éloignées de 50 km à l'amont de la ville, il y a 4 heures d'attente entre l'origine de regroupement du ruissellement et l'arrivée de la crue dans la ville (8h30 alerte à Goudet, 12h30 début de la crue à Brives-Charensac).
- Vaison-la-Romaine : il y a un décalage de 2 h 30 entre la fin de la pluie (11h00) et le début de la crue (13h30).

Nous en déduisons deux remarques pour l'effet retard :
Les décalages sont dus à la distance, à l'éloignement des chutes de pluie par rapport au lieu de la catastrophe. L'effet retard peut donc permettre l'évacuation des populations des zones inondables d'aval.

b- L'effet tampon⁽²⁾

Nous remarquons que le "milieu" où l'eau tombe influe sur la rapidité de l'arrivée de la crue.

Pour un milieu artificiel urbain, imperméable, (Paris) l'effet tampon est nul. La crue est quasi immédiate (10 minutes de délai).

Pour un milieu naturel de montagne et boisé (Vaison-la-Romaine), en plus de l'épicentre peu éloigné (300 mm de pluies à Entrevaux situé à 6 km à l'amont) la crue met 1h00 à devenir dangereuse, après l'arrêt des pluies.

Pour un milieu mixte péri-urbain (Nîmes), le décalage est de 7 heures entre le début des pluies (minuit) et l'arrivée de la crue (7h00 du matin) malgré un éloignement très faible sur un rayon moyen de 5 km autour de la ville et des sols saturés.

Les zones pavillonnaires de Nîmes, et les murs de clôtures ancestraux de la garrigue ont exercé tout compte fait un excellent effet tampon pendant la catastrophe du 3 octobre 1988, par un stockage mécanique des eaux (pp. 298 à 301).

Nous en concluons donc :

- pour les milieux artificiels (urbanisés, revêtus), un EFFET IMMEDIAT pour la formation de la crue et donc un coefficient de ruissellement à 100 % ($Cr = 1$).
- pour les milieux naturels (boisés) et les milieux pavillonnaires (plantés et avec murs de clôtures de rétention), un EFFET TAMPON important.

(1) Effet retard : Temps mort entre le début d'un phénomène et la réponse correspondante, dû à la propagation d'une matière, ici le ruissellement

(2) Effet tampon : Indique un dispositif d'accumulation, de stockage.

Les deux termes sont des termes se rattachant au domaine de l'environnement.

2.2.3.5. Des signes avant-coureurs proches de la catastrophe

Nous avons noté, d'après les récits, des signes avant-coureurs rapprochés, de dernière alerte, du risque majeur de ruissellement :

- la VIOLENCE des chutes de pluie, quand elles ont lieu sur place [2] ;
- le BRUIT de la rivière ou des ruisseaux, quand le niveau de l'eau commence à monter dans son lit mineur (le Grand-Bornand, Vaison-la-Romaine), des personnes ont fui à temps en entendant ce bruit ;
- le CHARRIAGE de bois, troncs et objets divers dans les eaux du lit mineur avant le débordement (le Grand-Bornand, Brives-Charensac) ;
- le REFOULEMENT DES EGOUTS et leur débordement sur la voie publique : pour Vaison-la-Romaine, le refoulement a eu lieu vers 13h30, soit au tout début de la montée des eaux et deux heures avant le paroxysme.

2.2.3.6. L'arrêt de fonctionnement des centres vitaux

Les centres vitaux ont été bloqués dans la plupart des catastrophes pour deux motifs :

- l'ennoiement des centres vitaux,
- l'arrêt de l'électricité dans ces centres.

a- L'ennoiement des centres vitaux :

- POUR LA CATASTROPHE DE PARIS (1990)

L'ennoiement du central des feux tricolores a provoqué un embouteillage général de la capitale sur six heures, bloquant en particulier toutes les ambulances (16h00-22h00).

Les transports en commun ont été ennoyés : Métro, RER, interrompant le trafic jusqu'au lendemain.

- POUR LA CATASTROPHE DE NÎMES (1988)

La Préfecture et le service du CODIS, les sapeurs-pompiers, la station d'épuration, le central téléphonique, l'état civil ont été ennoyés.

- POUR LA CATASTROPHE DE VAISON-LA-ROMAINE (1992)

Le central téléphonique a été ennoyé.

- POUR BÉDARRIDES (1992)

Les bâtiments des pompiers ont été ennoyés.

b- Coupures d'électricité

Les coupures d'électricité par l'EDF, ou par destructions de poteaux électriques ont provoqué des dysfonctionnements en chaîne des centres vitaux (Nîmes, Vaison-la-Romaine, ...).

Pour Nîmes, l'arrêt de l'électricité dès le début de la crise a coupé le téléphone et renforcé l'isolement. Cela a aussi interrompu les stations de pompage de l'eau potable et la pression dans le réseau "incendie", le rendant ainsi inefficace, pour la lutte contre les incendies (59 incendies pendant la crise [47]).

2.2.3.7. Les défaillances des appareils de mesure

Les appareils de mesure, limnigraphes pour la hauteur des rivières, pluviomètres et pluviographes pour la hauteur des pluies tombées et la densité des pluies, se sont trouvés hors d'usage dans les catastrophes étudiées.

Causes des dysfonctionnements : les seuils des appareils et les coupures d'électricité.

LE LIMNIGRAPHE DU GRAND-BORNAND était prévu pour une hauteur d'eau de 3 mètres. Les laisses de crues sur les piles du pont se sont trouvées à 6 mètres de hauteur.

POUR NÎMES, très peu de pluviomètres ont continué de fonctionner au moment de la crise, la plupart se sont arrêtés par SATURATION.

Les pluviographes qui ont continué à fonctionner, comme celui installé sur la toiture de la DDE, ont subi des DEBORDEMENTS, c'est-à-dire que d'importantes quantités d'eau n'ont pas été enregistrées (cf. l'article de l'auteur dans la revue "Naturellement" Nîmes) [107].

• POUR PARIS ET LA SEINE-SAINT-DENIS (1990)

Très peu de pluviographes ont fonctionné, par manque d'électricité ; les enregistrements n'ont donc pas été transmis.

2.2.3.8. Les impacts de foudre

Pour chaque catastrophe, nous notons la détérioration d'appareils vitaux par des impacts de foudre.

Les bâtiments administratifs ne semblent pas toujours protégés contre la foudre : exemple de l'impact de foudre sur la station météorologique de Paris-Montsouris (1988) avec destruction de tous les appareils.

Pour la catastrophe de la Seine-Saint-Denis (1990), des impacts de foudre transitant sur les câbles Télécom, sont arrivés à pénétrer dans les bâtiments de la DDE et des secours Codis par l'absence de plots d'isolation, et à détruire tous les appareils de mesures et d'informatique de la DDE.

La foudre a en particulier détruit les appareils de radar de la météorologie à Rosny douze heures avant la catastrophe.

2.3.- LA GESTION DE LA CRISE

Sera étudiée la gestion des crises de ruissellement pendant l'événement lui-même, et non la gestion postérieure aux crises, qui est relativement aboutie.

Nous aborderons deux points en nous appuyant sur des cas :

- 2.1. La gestion collective,
- 2.2. Le comportement individuel.

2.3.1. LA GESTION COLLECTIVE DE LA CRISE

Il existe une série de similitudes entre les différentes catastrophes pour la gestion des secours collectifs au niveau de la pré-alerte et de l'alerte.

2.3.1.1. La pré-alerte

a- Les informations météorologiques : les B.M.S.

POUR LE GRAND-BORNAND (1987), un bulletin météorologique spécial du centre météorologique de Lyon est transmis à onze heures le 14 juillet (jour férié) au CODIS de la région, situé à 500 mètres par hasard du camping qui sera sinistré. Ce B.M.S. prévoit des orages pour la fin de la journée, mais pas de dispositions alarmantes.

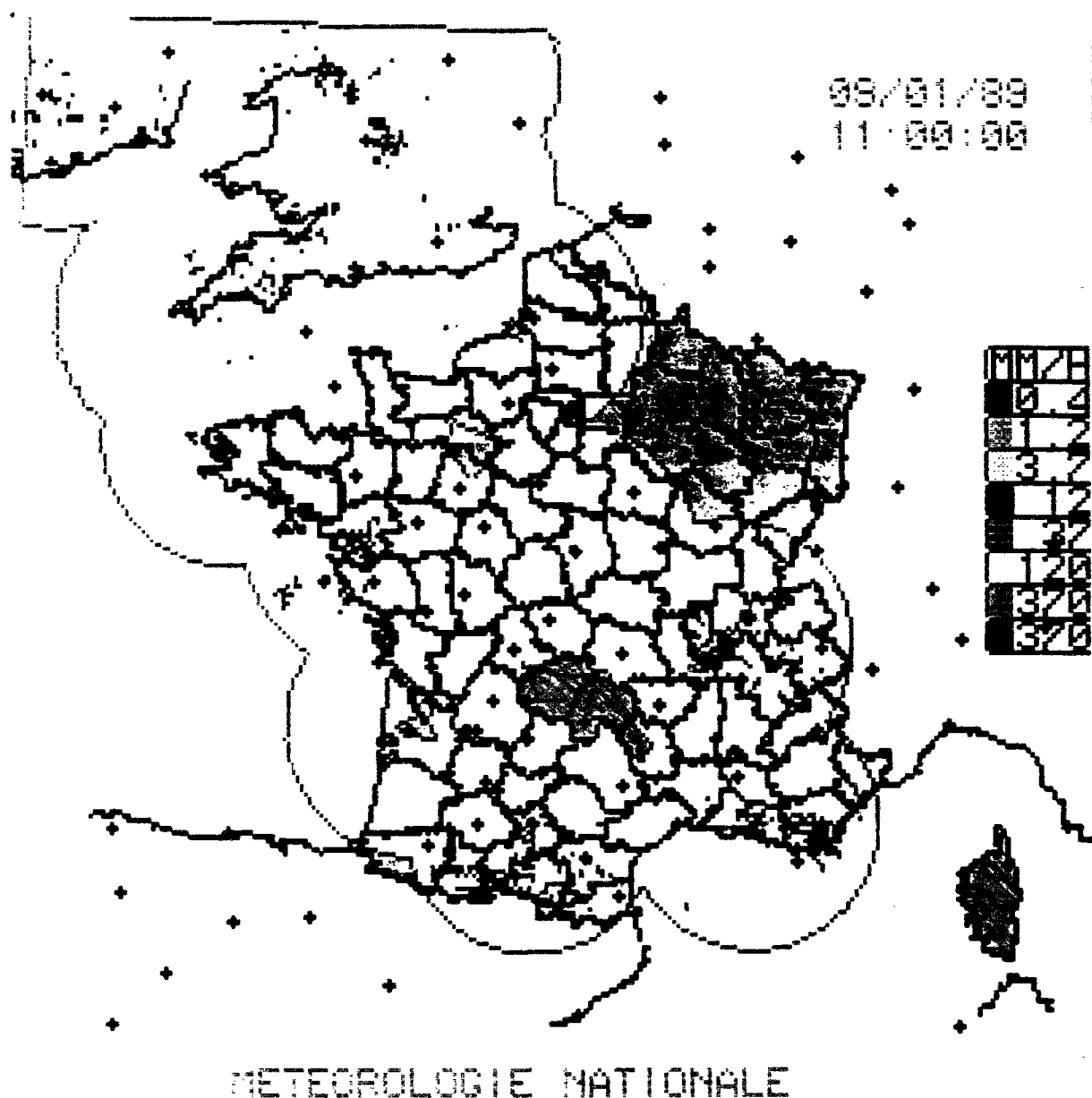
L'annonce de l'événement a donc lieu sept heures AVANT la catastrophe, mais sans mention du risque (rapport SOULIMAN [42]) alors que la météorologie helvétique⁽¹⁾ avait informé la France du risque avec fortes concentrations de cumulo-nimbus (cf. VIE LE SAGE [33]).

POUR NÎMES (1988) : l'annonce de pluies exceptionnelles a été faite pour toute la région, mais sans indication d'alarme. Aucun secours n'était prêt.

POUR PARIS (1990) : plusieurs B.M.S. ont été lancés mais pour des VENTS très violents accompagnés de pluies (figure 87). Les services de secours seront donc en état d'alerte, mais pas la population.

POUR VAISON-LA-ROMAINE (1992) : l'alarme a été donnée par le service national METEO-FRANCE, avec un bulletin prévisionnel de chute de pluies de 300 mm 24 heures à l'avance.

(1) La France entretient des rapports étroits au niveau de la Météorologie avec la Suisse et l'Angleterre (figure 98)



■ Zones françaises non couvertes par le réseau de radars météorologiques.

Figure 98 : Liaisons météorologiques France-Suisse-Angleterre (pas de liaisons avec l'Allemagne, l'Espagne et l'Italie) (carte de la Météorologie Nationale de la station de Trappes du 8.1.1989)

• LE CHEMINEMENT D'UN B.M.S. À L'INTÉRIEUR DES SERVICES (étude de Madame de VANSSAY, CREDA-EHESS⁽¹⁾, "L'inondation du Vaucluse" du 22 septembre 1992 p.16 [44]) :

Pour Vaison, le B.M.S. est arrivé par pneumatique au Cabinet du Préfet le 21 à 18 heures. Il monte au Directeur de Cabinet et le Secrétaire Général fait les diffusions vers les pompiers et les services.

La DDE est responsable du service d'annonces des crues et elle a son propre réseau en plus.

Les responsables locaux n'ont eu connaissance du bulletin que le lendemain vers 12 heures, soit encore une heure avant le début de la montée des eaux. Il a donc fallu 18 heures pour que l'alerte parte de la Préfecture et arrive aux services de secours.

b- L'annonce des crues

L'annonce des crues dépend du service de la navigation. C'est donc le deuxième moyen dont nous disposons pour l'alerte contre le risque de ruissellement.

Mais,

POUR BRIVES-CHARENSAC (1980) : l'annonce de crue a été faite par une personne "bénévole" et attitrée depuis trente ans à Goudet (à cause de la situation de sa maison et de la facilité de lecture des échelles sur la pile du pont). Cette personne a prévenu l'Équipement le matin de la crue, soit quatre heures AVANT la catastrophe de Brives, mais sans résultat. Or, tout le monde sait que lorsque Goudet annonce une crue de la Haute-Loire, celle-ci met trois heures pour atteindre Brives.

POUR LE GRAND-BORNAND : l'annonce de crues n'a pas fonctionné. POUR NÎMES : il n'y a pas d'annonce de crues sur les petites rivières asséchées l'été.

POUR VAISON-LA-ROMAINE : l'annonce de crues n'a pas fonctionné, par faute de courant électrique, le réseau ayant été interrompu juste au moment où l'ALARME aurait été la plus utile.

c- L'alerte par téléphone

Dans le Vaucluse, l'alerte est basée sur le principe des MESSAGES TELEPHONÉS (modèle alerte inondation). L'alerte prévue par téléphone a-t-elle vraiment des chances d'aboutir par temps de gros orages ? (étude Madame de VANSSAY [44] p. 15).

Comme nous l'avons vu, dans toutes les catastrophes de ruissellement le téléphone a été coupé, soit par l'EDF, soit par la foudre, soit par destruction de poteaux PTT ou de poteaux d'alimentation EDF.

Il y a donc peu de chance que le message d'alerte arrive à destination et le modèle "alerte inondation" est donc incohérent.

Il y a eu des MESSAGES d'alerte laissés sur répondeur, et il y a aussi beaucoup de communes qui n'ont pas de FAX (fin 1992).

⁽¹⁾ CREDA : Centre de Recherche sur les Dysfonctions de l'Adaptation - Paris
EHESS : Ecole des Hautes Études en Sciences Sociales

2.3.1.2. L'alarme

a- L'absence de gestion

Pour la catastrophe de NÎMES : absence totale de secours collectifs pendant toute la crise. Seuls sont intervenus des services à titre individuel (casernes, EDF, services municipaux) pour un sauvetage de proximité.

b- Une gestion inappropriée

Pour la catastrophe du GRAND-BORNAND : les secours par hélicoptère se trouvaient sur d'autres missions de secours, de degré mineur.

Pour la catastrophe de BÉDARRIDES (1992) : les sapeurs-pompiers étaient déjà installés le long de la rivière, avec leurs motopompes, avant le début de la crise pour une mission "d'épuisement" de la rivière avec les groupes électrogènes. Les eaux de ruissellement et de débordement les ont pris à revers (avec pertes de véhicules).

c- Absence d'information de la population du risque

Pour aucune des grandes catastrophes citées, la population n'a été informée de la probabilité d'inondations et des risques encourus.

CONSTAT : il n'y a aucun "PLAN D'EVACUATION INONDATION" dans les campings, grandes surfaces (les "Casinos" en particulier cités pour Nîmes et Vaison), écoles, ... alors qu'il y a des "PLANS D'EVACUATION INCENDIES".

d- Absence d'évacuation de la population

Il n'y a pas eu d'évacuation de la population dans les zones à risque d'inondation pour les sept principales catastrophes citées.

Seul un gestionnaire privé d'un autre camping au Grand-Bornand a sorti les gens des tentes et caravanes.

e- La résistance à l'évacuation

Nous pensons donc qu'il y a en France une certaine "réticence" à faire pré-évacuer les populations, contrairement aux USA par exemple. C'est cette réticence de divers services qu'il faudrait analyser pour comprendre et faire disparaître ce frein pour la Décennie Internationale en cours, aussi bien pour les catastrophes de ruissellement que pour les autres catastrophes : ouragans, séismes, ...

- résistance à l'évacuation des services de secours,
- résistance personnelle à l'évacuation (cf. l'étude de Madame de VANSSAY [44]) où les gens préfèrent rester sur place et s'enfermer dans leurs caravanes.

- LES CAMPINGS

L'évacuation est plus difficile suivant la nationalité des intéressés [44].

Un groupe de 90 stagiaires suisses à Vaison-la-Romaine (centre culturel "A Coeur Joie") évacue sans problème, sans doute grâce à la cohésion du groupe, alors que 17 autres stagiaires français se réfugient sur un toit vulnérable.

Etude à Caen sur les réactions d'une population d'appartenance nationale différente pour des consignes : le suivi des consignes a été meilleur chez les hollandais que chez les grecs ou les français.

A Vaison, l'évacuation après la catastrophe doit se dire en ANGLAIS, et beaucoup de touristes épargnés préfèrent rester dans les lieux (anglo-saxons et belges).

- USA

Nous ne pouvons qu'être en admiration devant l'évacuation de 200 000 personnes faite aux USA en Floride pour le Typhon "Andrew" en 1992, où il n'y a pas eu de morts pendant l'événement.

2.3.1.3. Le déclenchement des secours : les hélicoptères

POUR BRIVES-CHARENSAC (1980) : le plan Orsec a été déclenché à 14h30 soit deux heures après la montée de l'eau dans les rues. Ce déclenchement a permis de sauver 135 vies par hélitreuillage pendant la crise mais les premiers secours terrestres ne sont arrivés qu'à 17 heures (barques et scaphandriers), soit une heure après la fin de la grande crue.

POUR LE GRAND-BORNAND (1987) : le plan Orsec avait été déclenché avant la crue, mais personne du Codis ne connaissait le risque d'inondation le plus grave des deux campings.

C'est une personne qui a couru à pied les 500 mètres pour prévenir le Codis, alors que l'eau avait déjà commencé de submerger un camping.

Et c'est sur des retours de missions que les hélicoptères ont sauvé, par hasard, 37 vies.

POUR VAISON-LA-ROMAINE (1992) : les hélicoptères militaires demandés par le Codisc⁽¹⁾, au centre opérationnel des armées décollent de la base du LUC à 14 h 50, soit 1 h 30 APRÈS le début de la crise. A 16 h 19, ils sont obligés de se poser à AIX Les Milles (Bouches-du-Rhône) à cause du mauvais temps. Enfin, sur les lieux, ce sont 137 personnes hélitreuillées qui seront sauvées.

a- Les sauvetages dangereux

Nous avons répertorié deux types de sauvetages dangereux par insuffisance de force physique des sinistrés ou fatigue, ou bien par hypothermie.

⁽¹⁾ CODISC : Centre Opérationnel de la Direction des Services d'Incendie et de la Sécurité Civile

- **LE PASSAGE PAR CORDE**

On cite pour la catastrophe de Brives-Charensac, un sauvetage dangereux mais non mortel, avec une corde tendue où un sinistré devait avancer main par main au-dessus du courant. Avec le poids de la personne, la corde a plié et la tête a été sous l'eau.

- **HÉLITREUILLAGE MORTEL**

C'est à Vaison-la-Romaine qu'un hélitreuillage a été mortel, où deux personnes avaient été mises ensemble dans le même treuil (une mère et un enfant) et où l'enfant a glissé, malgré les efforts de la mère épuisée pour le retenir, puis est tombé. Il existe donc des exemples de sauvetages à risques.

b- Absence d'alarme sonore

Nous avons noté pour toutes les catastrophes l'absence totale d'alarmes sonores, aussi bien au niveau des villes, bourgs, qu'au niveau des établissements. Encore faudrait-il que les sirènes puissent fonctionner même avec des coupures de courant, sur du matériel de secours.

c- Incompréhension du risque par les secours

POUR NÎMES (1988) : aucun service de secours n'a pu voir et comprendre l'ampleur de la crise, sinon l'observation directe autour de soi.

POUR VAISON-LA-ROMAINE (1992) : les secours de la Gendarmerie n'ont pas jugé bon "d'évacuer le camping pour ne pas créer d'effet de panique pire que l'inondation" ... Les conséquences de ce choix ont été mortelles (presse, Paris Match 8 octobre 1992).

Par contre, le lieutenant des pompiers téléphone aux écoles et aux campings vers 13 h 30 pour un avis d'évacuation, mais pas vraiment suivi (enregistrements des coups de téléphones passés sur bande) (étude B. de VANSSAY [44]).

2.3.2. LE COMPORTEMENT INDIVIDUEL PENDANT LES CRISES

2.3.2.1. L'incompréhension individuelle du risque

Nous savons que le début de la crue est d'abord vu comme un "SPECTACLE".

POUR LA CRUE DE BRIVES-CHARENSAC (1980) : il y avait beaucoup de monde sur les digues jusqu'à 12h00 pour CONTEMPLER les eaux en furie. La digue sera submergée une heure plus tard (13h00) sur plus de 1,50 mètres.

POUR LE GRAND-BORNAND (1987) : des personnes du terroir ont filmé la catastrophe en vue plongeante, et le "SON" a dû être censuré vu les propos pendant le tournage sur les gens en perdition (étude du CREDA, Madame de VANSSAY).

POUR BÉDARRIDES (1992) : vers la fin de l'après-midi, juste avant l'inondation, il y avait près de 200 personnes sur le pont de Beauregard sur l'Ouvèze en train de regarder la montée de la crue. Comme il s'agissait d'un vieux pont en dos d'âne, il a fallu aller chercher les gens isolés au milieu du pont, avec une barque.

2.3.2.2. La compréhension du danger : les objets flottants anthropiques

Certaines personnes ne comprennent le danger qu'après avoir VU passer dans le courant certains objets :

- "je n'ai vraiment compris le drame (alors qu'il y avait déjà de l'eau dans les rues) que quand j'ai vu passer une TABLE avec un repas servi et un verre à moitié rempli de vin" témoignage d'un habitant de Brives [2].

D'autres n'ont compris la gravité de la situation que lorsqu'ils ont vu passer des caravanes dérivantes occupées (le Grand-Bornand, Vaison).

2.3.2.3. La sous-estimation du risque

- PRÉVENTION : SIRÈNES

A Brives-Charensac, une sirène a sonné une heure avant la crue, tout le monde a cru à un incendie.

- PROTECTION

A Nîmes, des gens ont mis des serpillières à leur porte, alors que l'eau était déjà en train d'entrer par les fenêtres.

2.3.2.4. Des comportements à risques

Nous citons des comportements individuels ayant entraîné la mort:

- SAUVETAGE À RISQUE :

- décès d'une personne voulant sauver ses économies (Brives-Charensac),
- décès d'une personne voulant sauver sa voiture (Brives-Charensac),
- décès d'une personne voulant sauver son cheval (Vaison-la-Romaine),

- REFUS D'ÉVACUATION :

- décès de personnes refusant l'évacuation (Rennes-les-Bains, inondation du 28 septembre 1992).

- FAUX REFUGE : les véhicules

- décès de personnes ayant trouvé refuge dans leur voiture (Fréjus) et leur caravane (le Grand-Bornand, ...).

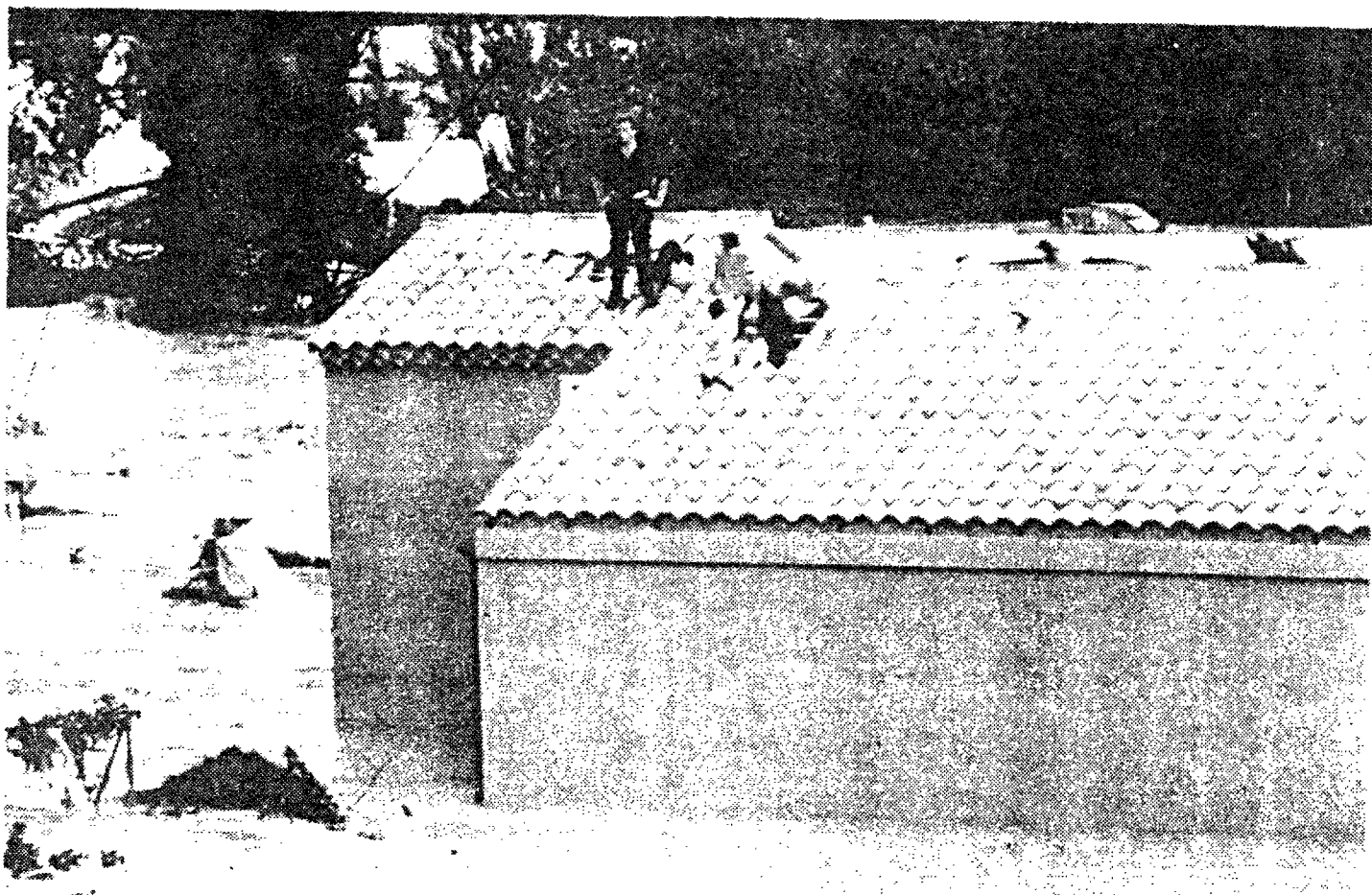


Figure 99 - Refuge sur toiture (Vaison-La-Romaine 1992)



Photo 100 - La ripisylve de Vaison-La-Romaine (camping)
pas de dégât sur la végétation (prise de vue
juillet 1993)

2.3.2.5. Des comportements de survie

a- La recherche de refuges : habitat à étages, arbres

- Le refuge dans l'habitat (photo 99) : c'est soit la demande d'accueil (les gens rentrent dans les maisons les plus proches, Brives-Charensac), soit l'incitation au refuge (les gens incitent à venir trouver refuge chez eux dès que l'eau atteint 0,10 mètre dans les rues, comme le "ramassage" spontané des enfants de Nîmes pendant leur trajet scolaire au cours de la crue du 3 octobre 1988.

Cette recherche de refuge peut se solder par des morts quand l'habitat s'effondre sous la poussée de l'eau (sanitaires du camping de Vaison-la-Romaine, maisons du lotissement de Théos à Vaison, ...)

- Le refuge dans les arbres : plusieurs dizaines de personnes sont sauvées à Nîmes (estimation entre 30 à 40, voire plus) pour s'être RÉFUGIÉES dans les arbres d'alignement adultes des rues de Nîmes composés de micocouliers et platanes (arbres à branches maîtresses solides) après avoir abandonné les toits de leurs voitures dérivantes.

Plus de 40 personnes sont sauvées à Vaison-la-Romaine pour s'être accrochées aux branches des arbres de la Ripisylve⁽¹⁾ (peupliers, saules, arbres à branches souples) (photo 100).

b- La natation

A Vaison-la-Romaine, beaucoup de campeurs doivent leur survie à leurs compétences en natation.

D'excellents nageurs, chacun avec un jeune enfant, abandonnent leur caravane dès le début de la crue et se jettent à l'eau pour gagner les peupliers, avec des techniques de nage, telles que le CRAWL, permettant de lutter contre des courants violents.

2.3.2.6. Conclusion : l'apprentissage du risque

Deux types de comportements existent en cas d'inondation pluviale : ce sont donc soit des comportements à risques, et en particulier à risque mortel, soit des comportements de survie. L'apprentissage des comportements de survie est donc nécessaire puisque ces comportements ne sont ni automatiques, ni généralisés, en particulier l'apprentissage d'une "nage rapide" en milieu scolaire. Actuellement, en France, seule l'apprentissage de la "brasse" est obligatoire, et depuis 30 ans uniquement. Ce qui fait que les générations au-dessus de 40 ans ne savent pas toujours nager, en règle générale.

⁽¹⁾Ripisylve : Forêt alluviale

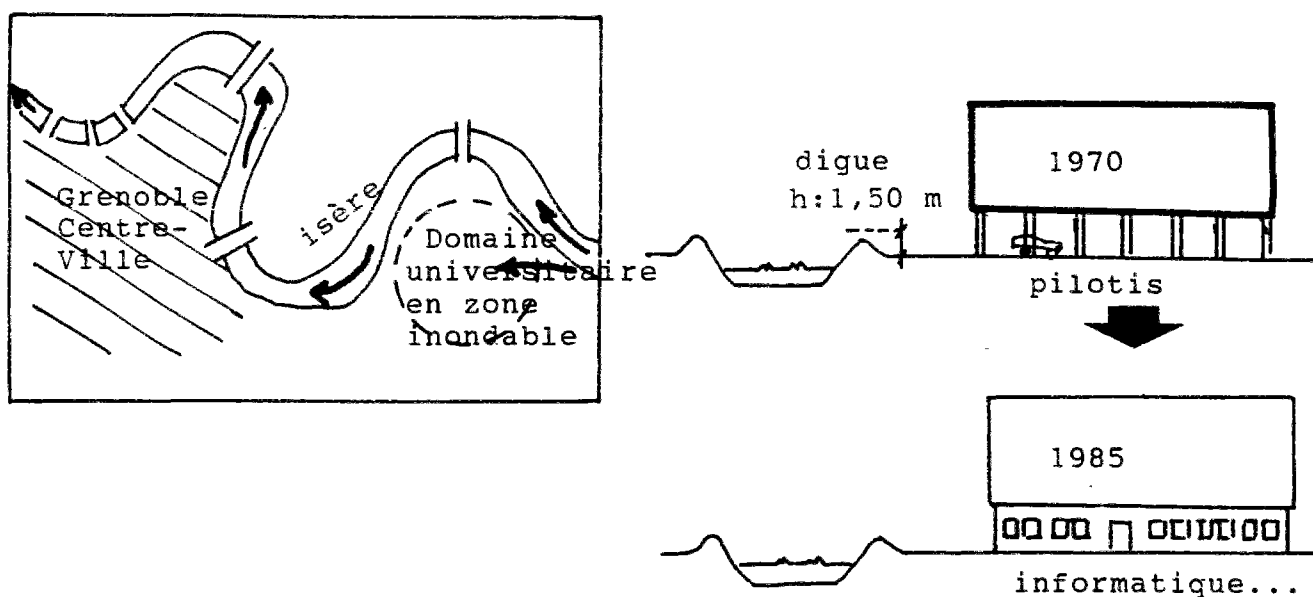
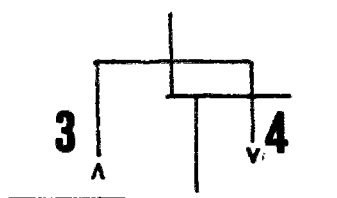
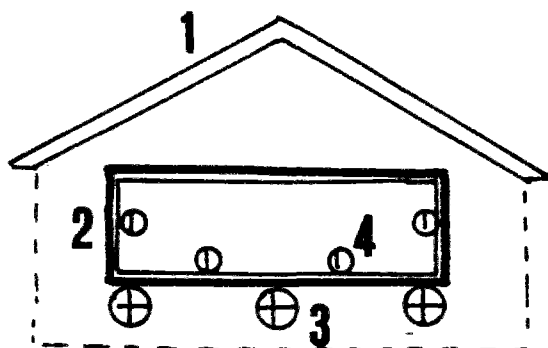
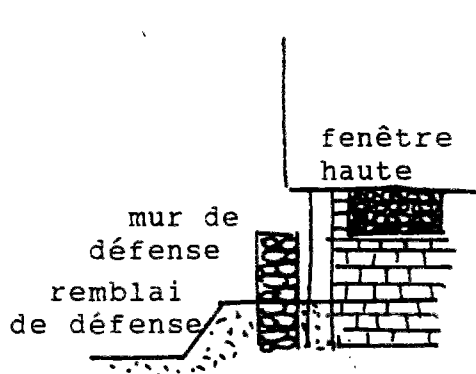


Figure 101 - Université de Grenoble: évolution des défenses contre les crues fluviales
les précautions d'origine: pilotis (1970),
destruction des précautions (1985)



principe des accès des R.d.C.
modifications à apporter

1. éperons
2. renforcement des murs en RdC
3. accès N+1 et RdC
4. création d'issues de secours RdC---1er

Figure 102 - Des propositions
a-Libération des rez-de-chaussée, remise à l'état d'origine
b- ou bien établissement de défenses anti-crues

2.4.- DES CATASTROPHES PREVISIBLES

Nous avons relevé, aux cours de nos déplacements, un certain nombre de lieux où des catastrophes de même ampleur que celles étudiées pourraient arriver, avec des conditions météorologiques identiques.

Nous les citons :

- l'université de Grenoble et la ville,
- le lycée d'Etat à Nice et la ville,
- la ville de Clermont-Ferrand,
- la ville de Lanslebourg,
- la ville de Morlaix,
- les campings de l'Ariège (Tarascon, Mas d'Azil, etc.).

<p>2.4.1. CATASTROPHE PRÉVISIBLE À L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE Constructions sur pilotis et crue rapide de la rivière par ruissellement différé</p>

2.4.1.1. Les précautions d'origine (figure 101)

Malgré les précautions prises contre le risque d'inondation lors de sa construction en 1970 (applications des conditions spéciales de l'article R.111-3), l'université de Grenoble, construite sur pilotis de 3 à 4 mètres de hauteur et avec un endiguement de protection de la rivière, est devenu un lieu à haut risque.

2.4.1.2. Evolution des protections

Les rez-de-chaussée, "libres" à l'origine, se sont "remplis" de salles de recherches, de salles d'informatique, car les étages étaient déjà occupés par les activités prévues à la construction, et le "poids" des nouvelles machines nécessitait des structures solides, un bon support, le sol en l'occurrence.

2.4.1.3. Dégâts prévisibles

• MATÉRIEL

Ce sont les équipements les plus onéreux (central informatique, laboratoires) qui sont situés dans les lieux les plus vulnérables à l'inondation, d'où les dégâts importants prévisibles.

• PERSONNEL

Les postes de travail (personnel, étudiants) liés à ces équipements sont aussi des postes à risque d'autant plus graves que nous n'avons ni vu ni entendu parler **d'issues de secours**, avec échelons intérieurs, vers les étages.

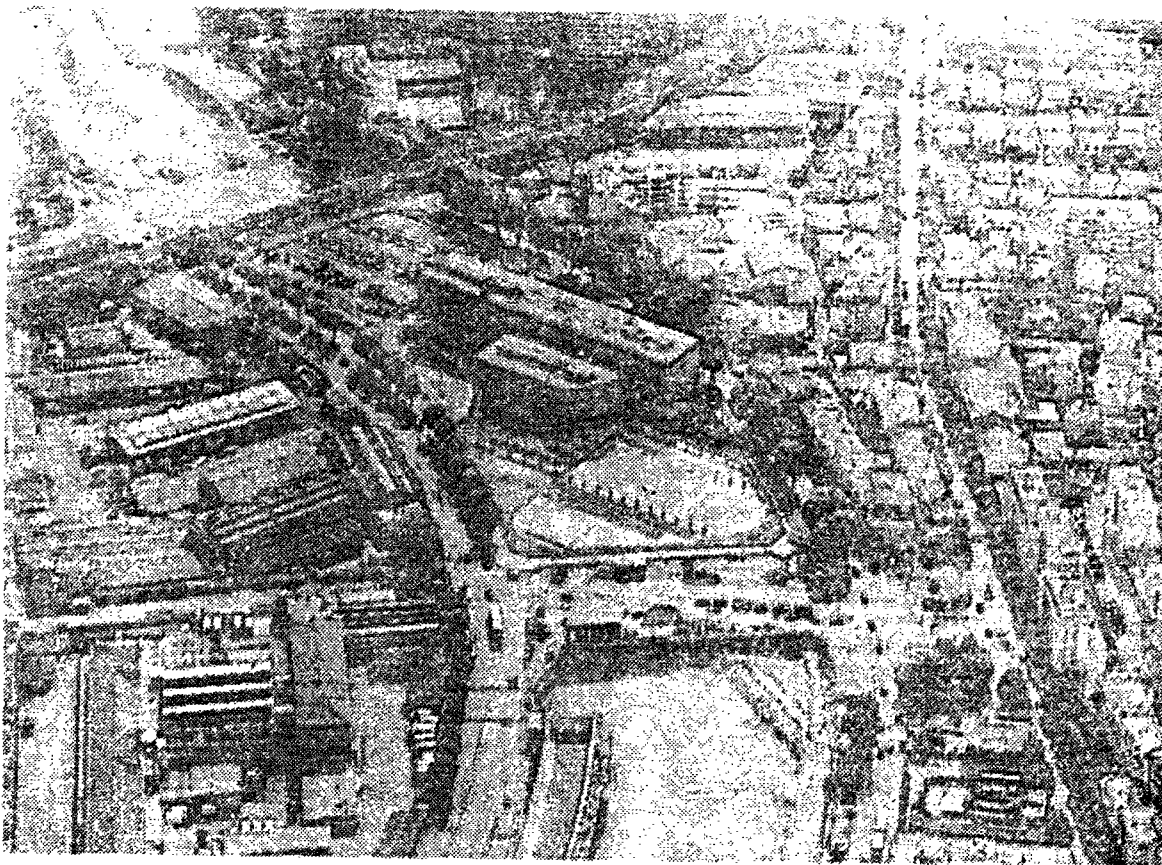


Photo 103 - La rivière le Paillon et le Lycée d'Etat
(photo Nice-Matin Octobre 1992)

En effet, les plans d'origine, ne prévoyant aucune activité en rez-de-chaussée, et donc aucun occupant fixe, n'ont pas prévu ce type d'évacuation rapide altimétrique.

2.4.1.4. Nos propositions (références chapitre 3.3.4.) (croquis 102)

a- Construction de murs-parapets en épis devant les nouveaux murs des rez-de-chaussée, d'autant plus que les murs de remplissage en parpaings entre les pilotis n'ont pas la résistance suffisante à un courant de 4 à 11 mètres/seconde, chargés de blocs, de voitures, etc.

b- Renforcement des murs existants en rez-de-chaussée.

c- Libération des rez-de-chaussée des activités à grand public (bibliothèque, cantine, ...).

d- Exercice annuel d'évacuation (vers les étages) avec mise en place d'échelons intérieurs et trappes tous les 10 mètres par exemple, en fonction du nombre d'occupants.

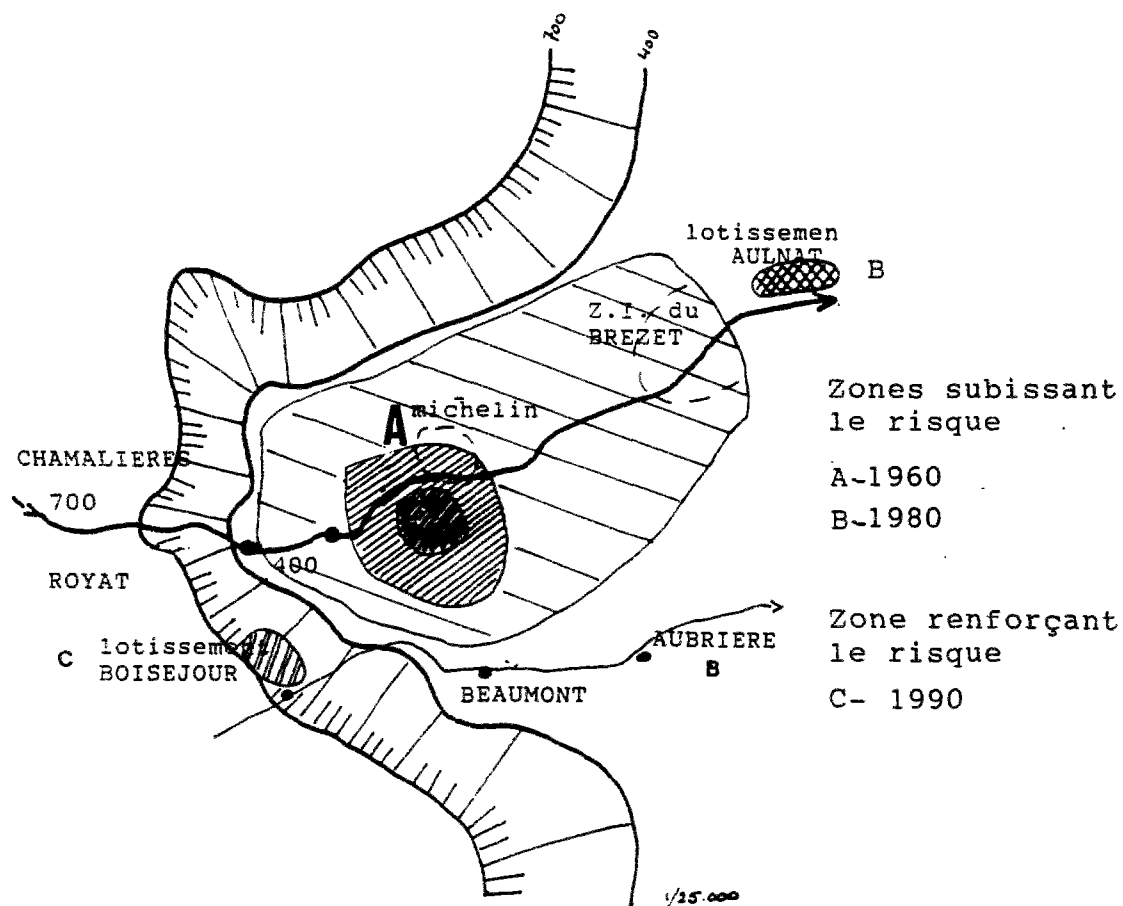
<p>2.4.2. CATASTROPHE PRÉVISIBLE DE LA RIVIÈRE LE PAILLON À NICE ET INONDATION DU LYCÉE D'ETAT Problème des rivières sèches et des crues rapides de ruissellement</p>

Le lycée d'Etat est construit sur une dalle recouvrant la rivière, construction récente de 1985 (photo 103).

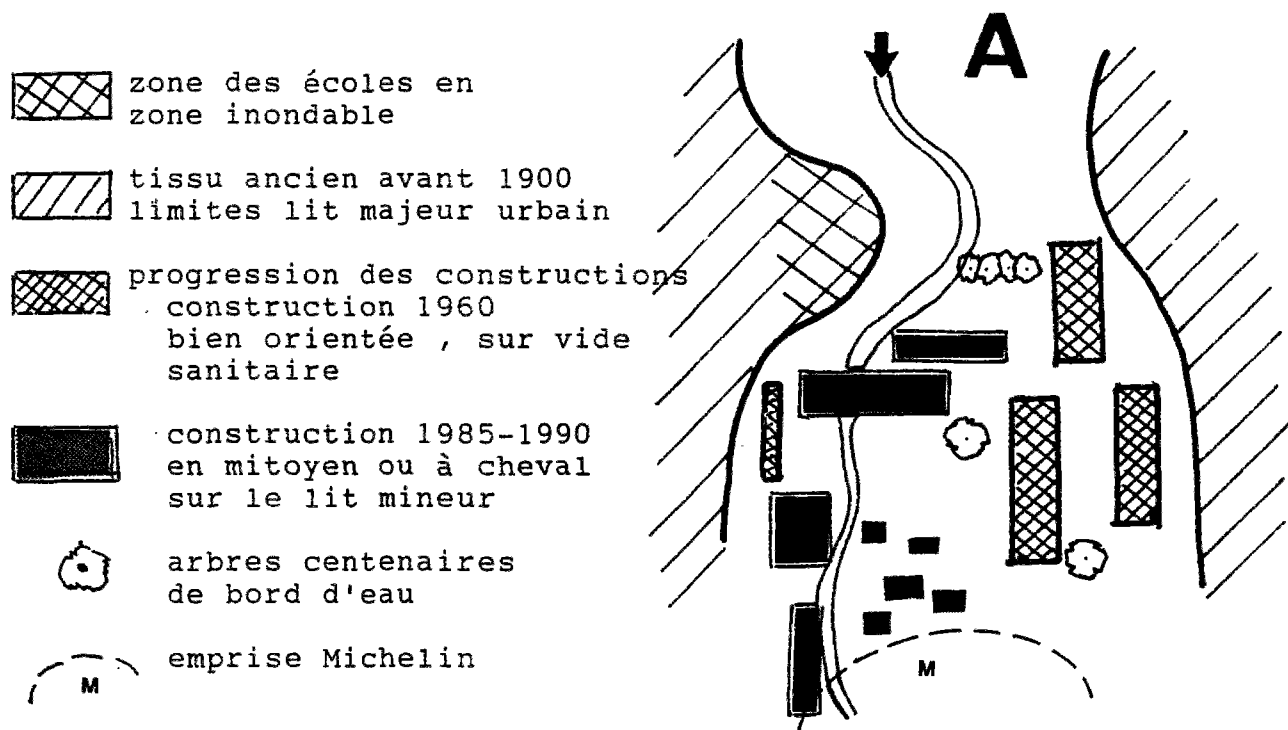
2.4.2.1. Les précautions d'origine

Nous nous posons les questions suivantes :

- pour quelle crue le recouvrement de la rivière a-t-il été prévu ? Pour une crue décennale, centennale, bicentennale ?
- en cas de débordement de la rivière sur la dalle, les murs du lycée sont-ils aptes à résister à des courants de 4 à 11 m/s chargés des blocs de rochers existants dans le lit d'amont ? Les murs sont des murs en panneaux préfabriqués et donc très vulnérables.
- l'évacuation totale des rez-de-chaussée en trois minutes par exemple vers les étages supérieurs est-elle possible ?
- où iront les 2 000 élèves, sur la toiture ? est-ce possible ? au niveau de la surcharge et de la surface disponible (norme maximale quatre personnes/m² ou 400 kg/m²) ?



a - Clermont-Ferrand, situation d'ensemble



b - Evolution de l'urbanisation du lit majeur de la Tiretaine à Clermont-Ferrand

Figure 104.- Catastrophe prévisible à Clermont-Ferrand

2.4.2.2. Nos propositions

Travaux de reprises de l'existant, bien qu'il eût été souhaitable de ne pas construire un équipement avec tant de personnes, et des ENFANTS, sur un lieu à si haut degré de risque.

a- Construction de murs-épis de protection.

b- Reconstruction des murs du rez-de-chaussée en pierre d'épaisseur 0,60 m en technique traditionnelle.

c- Mise en place des échelons intérieurs de secours à tous les étages.

d- Mise en place d'escaliers extérieurs de refuge pour les élèves se trouvant à l'extérieur du bâtiment au moment de la crise.

e- Exercice annuel d'évacuation sur les toits : alarme sonore inondation, plan d'évacuation et de sauvetage.

f- Bouées de sauvetage amarrées sur filins, existence de cordages, au même titre que les lances d'incendies fixes, et installées côte à côte.

2.4.3. CATASTROPHE PRÉVISIBLE À CLERMONT-FERRAND (plan 104a) Encombrement des lits majeurs urbains

Lors de nos visites prospectives dans cette ville, nous avons constaté un certain nombre d'anomalies SUR LE TERRAIN, en simulant approximativement une crue centennale pluviale par les techniques d'observation.

2.4.3.1. Des constructions à risques

a- Occupation des lits majeurs urbains

Il y a un nombre important de constructions à risque hydrologique qui se sont établies progressivement dans les lits majeurs, dans les zones inondables.

Les champs d'inondation sont visibles par les limites des maisons anciennes (fin du XIX) et les plantations de bord d'eau cinquantenaires (peupliers, saules).

L'urbanisation s'est implantée progressivement des bords du lit majeur vers l'occupation du lit mineur :

- constructions périphériques de 1960 sur vide sanitaire et parallèles au lit,
- constructions de 1980 à 1990, avec beaucoup de logements en rez-de-chaussée, de plein pied et perpendiculaires au lit (figure 104).

b- Construction à cheval sur les lits mineurs de rivières pérennes :

- exemple : l'OPAC de Clermont-Ferrand, construction d'immeuble collectif sur la rivière La Tarantaine à Chamalières.

c- Construction de la zone industrielle du Brezet en zone inondable

La rivière a été busée, pour quelle crue ? Décennale, centennale, historique ? La trace de la rivière a disparu faisant oublier le risque et les constructions sont à rez-de-chaussée en structure préfabriquée.

d- Les usines Michelin qui se trouvent dans les zones inondables, ont subi des inondations récentes.

e- Les ouvrages souterrains en lits majeurs sont nombreux, des garages récents en particulier (1990), construits mitoyens aux lits mineurs :

- exemple d'un garage privé souterrain à Clermont-Ferrand Avenue Maréchal Leclerc, rue Henri Barbusse),
- exemple du garage des HLM à Aubrière, construit au fond du lit mineur.

2.4.3.2. L'éventrement prévisible des rez-de-chaussée, des constructions établies à cheval sur lit mineur

Après avoir observé les destructions des PONTS de différentes tailles du Vaucluse pendant la journée du 22 septembre 1992 et avoir envisagé que ces destructions sont dues à l'ETROITESSE DES PASSAGES D'ÉCOULEMENT, à l'étroitesse des ARCHES ou BUSES, nous sommes inquiets pour les passages des écoulements prévus sous les bâtiments à Clermont-Ferrand, qui nous paraissent très étroits et en tout cas pas à l'ECHELLE de la capacité d'écoulement des traces du lit majeur des petites rivières. Surtout que le bassin-versant supérieur de Clermont est un bassin à possibilité d'enneigement et de fonte de neige rapide.

2.4.3.3. Le renversement des murs de clôtures perpendiculaires aux flots

Nous avons observé un certain nombre de clôtures construites en parpaings et perpendiculaires au courant qui n'ont aucune chance de résister même à un faible courant. Mais ces clôtures semblent avoir été établies pour protéger des baies vitrées de logement en rez-de-chaussée d'où le risque de fausse sécurité.

2.4.3.4. La destruction des constructions nouvelles

Elle est à envisager, à la prochaine crue, si les structures porteuses ou murs porteurs n'ont pas été calculés pour résister à une force de courants de 4 à 11 m/seconde. Les constructions les plus récentes (1980-1990) sont perpendiculaires au lit, alors que les constructions de 1960 étaient plutôt parallèles au lit, ce qui est tout de même une position de résistance meilleure (figure 104b).

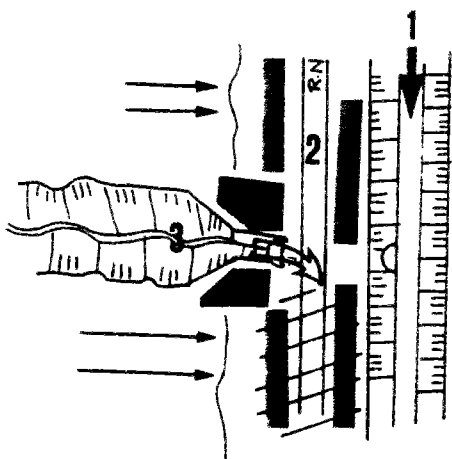
2.4.3.5. Dégâts prévisibles

- éventrement possible du rez-de-chaussée des immeubles de l'OPAC,
- renversement des murs de clôtures de protection des logements en rez-de-chaussée (construits en "technique légère" en parpaings, perpendiculaires aux flots, et sans raidisseurs,
- inondations de tous les parkings souterrains,
- ennoiment de toutes les maisons pavillonnaires de la zone avec risque d'ennoiment des premiers étages vu le dénivelé de l'ancien lit majeur.

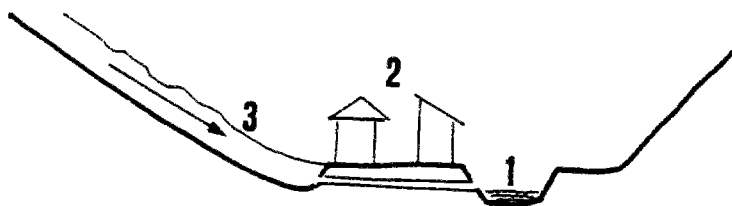
2.4.3.6. Nos propositions

- INFORMATIONS de la population : écoles, habitants, commerçants, etc...,
- RENFORCEMENT des clôtures de jardins en murs - parapets,
- PAS DE LOGEMENT ni d'archives en rez-de-chaussée dans les zones inondables par les crues historiques (cf. les recherches de M. LIVET LRPC et Jean-François VAYLEX) (OPAC, écoles, logements privés ou HLM, ...),
- prévisions des ÉVÉNEMENTS possibles, pour l'OPAC construit en panneaux préfabriqués,
- Issues intérieures de secours rapides pour tous les logements, pavillons, les bureaux vers les étages supérieurs (échelons, trappes, ...),
- Interdiction de nouvelles constructions dans les lits majeurs urbains (en particulier si l'usine Michelin est détruite, pas de constructions mais création d'espaces verts).
- Interdiction de nouvelles constructions sur les collines qui aggraveront le risque (comme le nouveau lotissement de Boiséjour),
- Constructions sur PILOTIS dans la zone industrielle du Brezet et les zones d'aval (lotissement d'Aulnat),
- Prévisions d'évacuation des ÉCOLES situées sur les limites ou dans les lits majeurs.

Situation

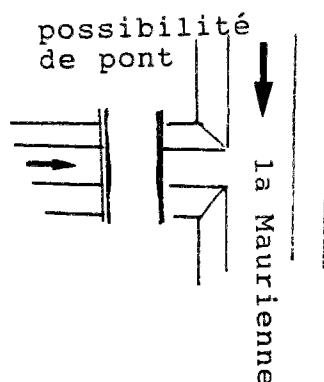


PLAN



COUPE

Proposition de modification -réouverture du ravin en zone urbaine



1-rivière canalisée

2-zone urbanisée

3-ravin

■ habitats nouveaux à
haut risque

▨ zone d'aval inondable

Figure 105 Lanslebourg, ruissellement et urbanisation



Photo 106

Le ravin de Lanslebourg:
rivière sèche, empreinte
du lit majeur et buse
d'accueil de 1200mm pour
l'entonnement urbain.

**2.4.4. CATASTROPHE PRÉVISIBLE À LANSLEBOURG - MONT-CENIS
VALLÉE DE LA MAURIENNE (ALTITUDE 1 400 mètres)
Lit majeur d'un ravin d'amont défini par les traces
physiques des écoulements**

De nouveaux logements viennent d'être construits à la base d'un ravin montagnard et autour de l'entonnement d'un rivière non-pérenne bus e par une buse de faible diamètre (diamètre Ø 1 200) (figure 105 et photo 106).

2.4.4.1. Des ouvrages à risques

Le diamètre de la buse ne semble pas proportionné à la taille du ravin d'où des débordements prévisibles sur la voie publique, et l'inondation de la partie aval de la ville.
Le risque semble important pour ces nouvelles habitations, surtout à la période de la fonte de neiges avec pluies.

2.4.4.2. Nos propositions

- Réouverture de la rivière avec le diamètre du ravin pour la traversée perpendiculaire de la ville et mise en place de pont et gué (plan 105).
- Interdiction de loger en rez-de-chaussée, et même aux premiers étages suivant les cas dans ce nouveau quartier réhabilité avec succès.

**2.4.5. CATASTROPHE PRÉVISIBLE   MORLAIX, VILLE BALNÉAIRE
DE BRETAGNE (FINISTÈRE)**

**2.4.5.1. Un site ancien à risques récents d'inondation
pluviale (figure 107)**

Le site de Morlaix est déjà touché par les problèmes de ruissellement, suite au DEBOCAGEMENT intensif et aux destructions des levées de terre du parcellaire agricole réalisés depuis 1970 par les remembrements (jugement du Tribunal Administratif condamnant la DDA pour la modification des lieux).

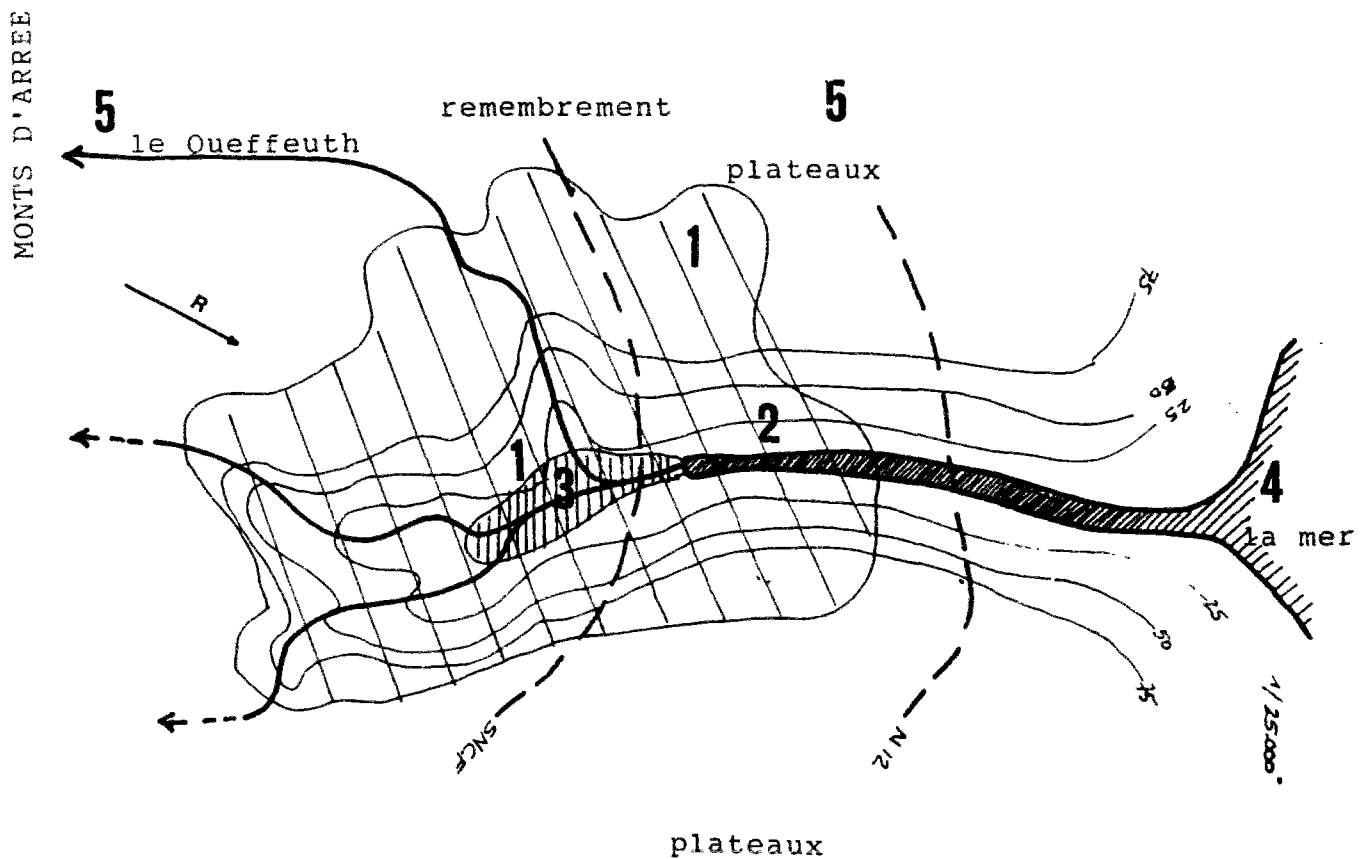



Figure 107 - Morlaix, d'après la
carte IGN 1/25.000

- 1. secteur urbanisé
- 2. le ravin de Morlaix
dénivellé de 50 mètres
- 3. la ville basse
- 4. mer
- 5. secteur remembré
bassin-versant jusqu'aux
Monts d'Arrée

 Zone à risque d'inondation par ruissellement

2.4.5.2. L'aggravation des problèmes

Il risque d'y avoir aggravation des problèmes d'inondation liées au ruissellement par le rehaussement du niveau de la mer, soit ponctuellement (prochaine marée centennale prévue en 1996 avec un coefficient de 119) soit définitivement par le rehaussement général des mers prévu pour le siècle prochain (données OMM cf. paragraphe 3.2.6.-b).

Dès que les conditions climatiques seront mauvaises (pluies, vents et vagues pour la mer), les eaux de ruissellement seront bloquées à L'EXUTOIRE par la hauteur des marées et pourront provoquer une inondation de la ville basse par "REFOULEMENT" ou par "MASCARET".

2.4.5.3. Nos propositions

Nous proposons :

- un REBOCAGEMENT du bassin-versant, avec reconstitution de levées de terre ou de murets en fonction du nouveau parcellaire avec RETENUES COLLINAIRES, ayant une fonction de rétention hydraulique de façon à obtenir le piégeage des crues centennales;
- une modification d'activités des rez-de-chaussée de la ville basse, avec interdiction d'habitation en rez-de-chaussée, et passages de secours d'évacuation vers les étages supérieurs ;
- le refus de tout nouveau permis de construire pour l'habitat, des activités, etc., dans les lits majeurs d'écoulement préférentiel de la crue.

CONCLUSION

L'analyse de terrain du chapitre 2 des catastrophes réelles de ruissellement majeur urbain nous conduit à aborder au chapitre 3 les questions des facteurs aggravants, des facteurs limitants du risque, et les techniques de lutte pluridisciplinaires historiques et nouvelles que nous pouvons adapter à ce risque nouveau, de notre époque.